

## ПОДШИПНИКОВЫЕ ТОКИ ПРИВОДНЫХ МАШИН В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

**Б.Ю. Васильев, А.Е. Козярук**

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург*

Частой проблемой электроприводов с полупроводниковыми преобразователями является ускоренный износ подшипниковых узлов приводного электродвигателя. Такие повреждения вызваны образованием в приводном электродвигателе подшипниковых токов, которое могут оказывать непрерывное или постоянное воздействие на подшипниковые узлы.

В данной работе проанализированы причины возникновения подшипниковых токов в приводных машинах современных электроприводов. Выделены и описаны основные виды подшипниковых токов, даны их характеристики. Описан основной негативный эффект и последствия длительного и кратковременного воздействия подшипниковых токов. Приведены основные способы измерения и контроля подшипниковых токов. Описаны способы борьбы с подшипниковыми токами, проанализирована их эффективность, даны рекомендации по их использованию в современных электроприводах. Приведены основные международные нормативные документы, регламентирующие допустимые значения подшипниковых токов и способы борьбы с ними. Даны рекомендации по развитию отечественной нормативной базы по подшипниковым токам.

Дальнейшие исследования подшипниковых токов приводных электродвигателей с полупроводниковыми преобразователями частоты будут заключаться в построении математических моделей процессов их возникновения с учетом режимов работы автономного инвертора, электродвигателя и заземления, их анализе путем имитационного моделирования и разработке алгоритмических способов их устранения.

*Ключевые слова:* подшипниковый ток, электропривод, электродвигатель, полупроводниковый преобразователь, энергетическая совместимость.

### Введение

В современных электроприводах (ЭП) для электроснабжения и управления приводными электродвигателями в большинстве случаев используются полупроводниковые преобразователи (ПП). Как правило, ПП имеют двухзвенную структуру с комплексом средств в звене постоянного напряжения (сглаживающие дроссель и конденсатор, тормозной ключ, тормозной резистор, устройство предварительной зарядки конденсатора и др.) [1–5]. На рис. 1 приведена типовая структурная схема электропривода с двухзвенным ПП.

На входе двухзвенного ПП устанавливается выпрямитель напряжения (диодный неуправляемый или транзисторный управляемый – активный), который через трансформатор или сетевой дроссель подключается к сети электроснабжения. На выходе двухзвенного ПП устанавливается автономный инвертор напряжения, который через преобразовательное (трансформатор) или фильтрокомпенсирующее устройство (синус-фильтр, моторный дроссель и др.) подключается к приводному электродвигателю [6–13]. Автономный инвертор напряжения ПП функционирует в импульсном

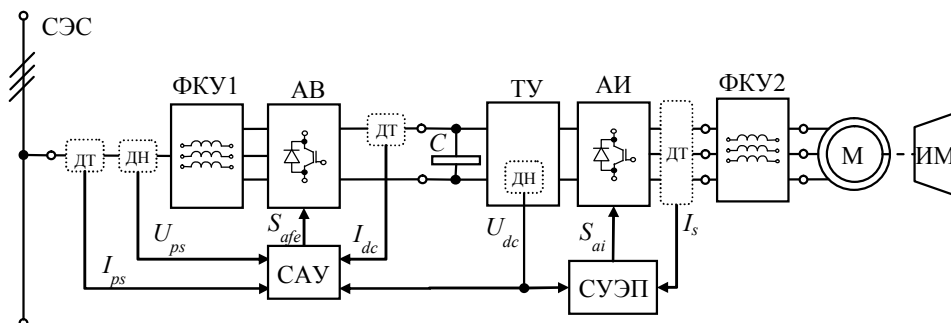


Рис. 1. Типовая структурная схема электропривода с двухзвенным полупроводниковым преобразователем: СЭС – система электроснабжения; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство; АВ – активный выпрямитель; ТУ – тормозное устройство; АИ – автономный инвертор; М – двигатель; ИМ – исполнительный механизм; САУ – система автоматического управления; СУЭП – система управления электроприводом; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения

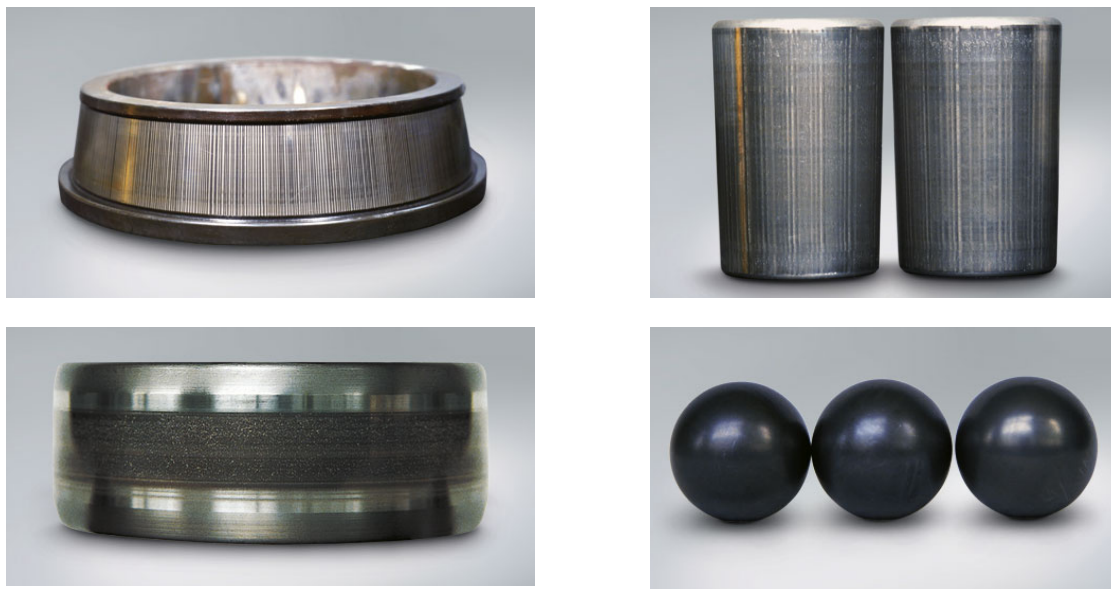


Рис. 2. Повреждения подшипников качения приводных электродвигателей подшипниковыми токами

режиме. Выходное напряжение автономного инвертора имеет форму высокочастотной последовательности импульсов с постоянной амплитудой и изменяющейся скважностью.

В большинстве случаев в современных электроприводах с ПП используются асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами. Частой проблемой электроприводов с ПП является ускоренный износ подшипниковых узлов приводного электродвигателя [14–20]. На рис. 2 приведены фотографии, на которых показаны повреждения подшипников качения приводных электродвигателей. Такие повреждения вызваны образованием в приводном электродвигателе подшипниковых токов, которые могут оказывать непрерывное или краткосрочное воздействие на подшипниковые узлы.

### Причины появления подшипниковых токов

**1. Электромагнитный дисбаланс.** Одним из основных факторов появления подшипниковых токов является несимметрия электромагнитной системы приводного двигателя, которая может возникнуть по следующим причинам:

- несимметрия напряжения, подводимого к обмоткам статора;
- различная величина активного сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора;
- зазоры в стыках между пакетами активной стали статора и ротора;
- несимметричное расположение полюсов;
- неравномерность воздушного зазора между ротором и статором.

Обозначенные факторы электромагнитного дисбаланса являются следствием несовершенства конструкции приводного электродвигателя, появляющегося из-за несовершенства технологии производства или неудовлетворительных (тяжелых)

условий эксплуатации. Несимметрия электромагнитного поля приводной машины, возникающая вследствие электромагнитного дисбаланса, приводит к появлению потенциала на валу и других массивных частях электродвигателя. Необходимо отметить, что такое наведение потенциала в массивных частях электродвигателя происходит, даже если напряжение обмотки статора имеет строго синусоидальную форму. Образованное напряжение вызывает появление подшипниковых токов.

**2. Механический дисбаланс.** Другой причиной появления подшипниковых токов является несовершенство механической части приводного электродвигателя, а именно собственно подшипниковых узлов.

Вследствие механического дисбаланса ротор приводного электродвигателя начинает совершать эллиптические движения в расточке статора. Такое движение ротора в расточке статора вызывает электромагнитный дисбаланс приводного двигателя, поскольку взаимодействие магнитных полей статора и ротора становится пульсирующим. Это приводит к наведению потенциалов на массивных частях электродвигателя, появлению паразитного напряжения, которое вызывают подшипниковые токи. Таким образом, механический дисбаланс приводного электродвигателя является не только следствием подшипниковых токов, но и их причиной.

**3. Наличие преобразователя частоты.** Главной причиной появления подшипниковых токов, протекающих в электродвигателях в современных электроприводах с ПП, является синфазное напряжение. Трехфазное напряжение на выходе ПП, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции, имеет форму высокочастотной последовательности импульсов, т. е. несинусоидальную форму. Это приводит к наведению потенциала в

массивных частях приводного электродвигателя. Коммутация автономного инвертора ПП осуществляется с высокой частотой. Частота коммутации современных автономных инверторов находится в пределах 1–25 кГц.

С одной стороны, разработчики приводной и преобразовательной техники стремятся увеличить частоту коммутации автономного инвертора для повышения синусоидальности выходного напряжения. Однако опыт разработки электроприводов с ПП и практические исследования подшипниковых токов показывают, что увеличение частоты коммутации приводит к увеличению синфазного напряжения и пропотенциала на массивных частях приводного электродвигателя возникают подшипниковые токи.

**4. Внутренняя электростатика.** Напряжение на валу приводного двигателя может быть вызвано накоплением внутреннего электростатического заряда.

**5. Внешнее электромагнитное воздействие.** Подшипниковые токи в приводных электродвигателях могут возникать под воздействием внешних электромагнитных полей различной природы. По этой причине подшипниковые токи могут циркулировать в различных частях электродвигателя длительное время даже в неработающем электроприводе.

#### Виды подшипниковых токов

Электромагнитный и механический дисбалансы, интенсивная электромагнитная обстановка вокруг моторного кабеля, соединяющего ПП и приводной электродвигатель, внешнее электромагнитное воздействие становятся причиной появления подшипниковых токов, которые могут иметь различные контуры протекания в электроприводе. Анализ контуров протекания подшипниковых токов необходим для разработки мероприятий по их устранению. Необходимо отметить, что описанные выше причины возникновения, как правило, вызывают появление подшипниковых токов, протекающих одновременно по различным контурам. Прямую взаимосвязь между причиной

их возникновения и контуром протекания установить затруднительно.

Контур протекания подшипниковых токов зависит от структуры ЭП, исполнения его основных элементов, электродвигателя, заземления, мощности. На практике чаще всего происходит наложение различных видов подшипниковых токов. В зависимости от контура протекания подшипниковые токи можно разделить на следующие виды (см. таблицу):

- узловые (внутренние);
- корпусные (внутренние);
- локальные (внешние);
- общий (внешние).

**Узловые подшипниковые токи.** Воздействуя на элементы подшипника приводного электродвигателя на его наружном кольце, шариках (или роликах) и внутреннем кольце может наводиться потенциал и, как следствие, напряжение. Если это напряжение достигнет величины, достаточной для преодоления сопротивления масляной пленки подшипников, то возникнет диэлектрический пробой. В результате образуется внутренний узловой контур «наружное кольцо – тело качения (шарик или ролик) – внутреннее кольцо». Контур узлового тока показан на рис. 3, а.

**Корпусные подшипниковые токи.** Наибольшему воздействию электромагнитными полями рассеивания активной части приводных электродвигателей подвергаются массивные элементы его корпуса и вал. В случае наведения на них напряжения и диэлектрического пробоя масляной пленки подшипника образуется внутренний корпусный подшипниковый ток с контуром «вал – подшипники – корпус». Контур корпусного тока показан на рис. 3, б.

**Локальные подшипниковые токи.** Наводимый электромагнитными полями потенциал приводит к появлению напряжения относительно заземления приводного двигателя и других элементов ЭП, заземляющего экрана проводников, нулевого контакта шины постоянного тока и других частей с нулевым потенциалом. Как и в предыдущих случаях, если это напряжение превышает значение напряжения пробоя масляной пленки, обра-

Виды и контуры подшипниковых токов

№	Вид подшипникового тока	Контур подшипникового тока
1. Внутренний		
1.1.	Узловой	Наружное кольцо – тело качения (шарик или ролик) – внутреннее кольцо
1.2.	Корпусный	Вал – подшипники – корпус
2. Внешний		
2.1.	Локальный	Вал – подшипники – заземление (заземленный экран) – земля
2.2.	Общий	Вал электродвигателя – передаточное устройство – вал исполнительного механизма – заземление (заземленный экран) – земля

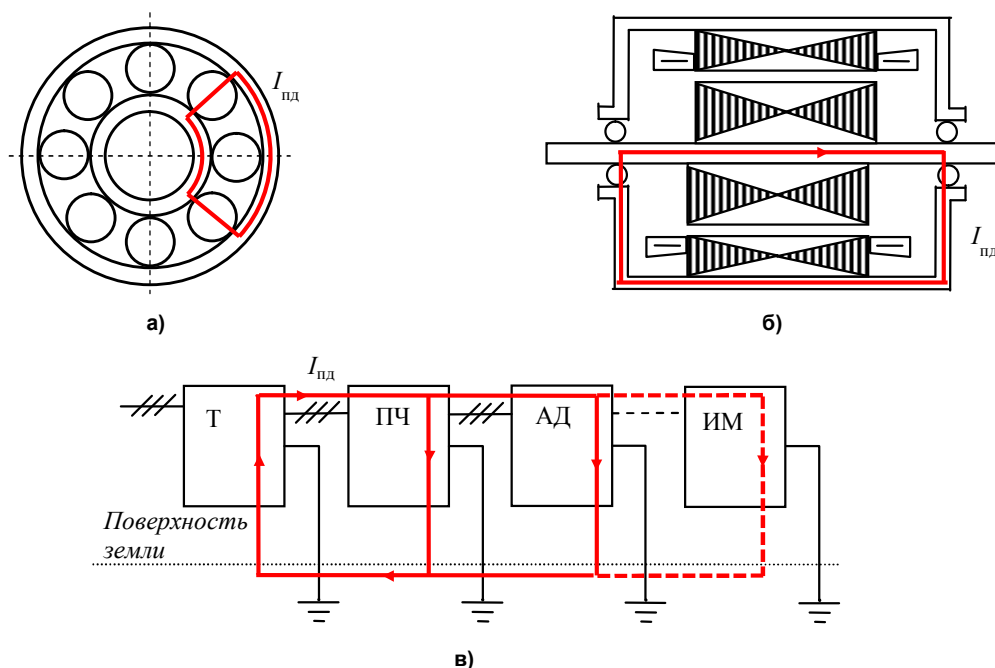


Рис. 3. Контуры протекания подшипниковых токов

зается внешний локальный подшипниковый ток с контуром «вал – подшипники – заземление (заземленный экран) – земля». Контур локального подшипникового тока показан на рис. 3, в сплошными линиями.

**Общие подшипниковые токи.** В случае, если приводной двигатель и исполнительный механизм имеют металлическое соединение, т. е. сочленены с помощью металлической муфты или передаточного устройства, то локальный подшипниковый ток может протекать не только через электротехнические части ЭП, но и через технологические – вал, подшипники и корпус исполнительного механизма. В этом случае образуется общий подшипниковый ток, который имеет контур «вал электродвигателя – передаточное устройство – вал исполнительного механизма – заземление – земля». Контур общего подшипникового тока показан на рис. рис. 3, в пунктирными линиями.

### Негативный эффект от воздействия подшипниковых токов

Напряжение между частями подшипника, которое образуется по вышеописанным причинам, между которыми протекает подшипниковый ток изменяется в пределах нескольких десятков вольт. Однако из-за малого значения сопротивления этой цепи подшипниковые токи приводных электродвигателей большой мощности могут достигать сотен ампер и находится в пределах 10–1000 А.

По характеру подшипниковые токи могут быть разделены на длительные, которые непрерывно действуют в течение времени, и кратковременные, которые протекают в виде электрических разрядов.

При действии длительного подшипникового тока происходит:

- нагрев частей (колец и тел качения) подшипников;
- нагрев масляной пленки подшипника;
- горение масляной пленки подшипника;
- образование электрической дуги между частями подшипника;
- эрозия подшипника;
- появление дугообразных канавок на поверхности колец подшипников;
- покрытие частей подшипника масляным нагаром.

При действии кратковременных подшипниковых токов:

- образуются электрические разряды;
- происходит искрение в подшипниках;
- спекание частей колец и тел качения подшипника;
- точечная эрозия колец и тел качения подшипника;
- образование кратеров на поверхности частей подшипника;
- локальный нагрев частей подшипника;
- чернение и нагрев (перегрев) частей подшипника и масляной пленки.

Различный характер повреждения подшипников приведен на рис. 2.

Главная опасность подшипниковых токов заключается в том, что приведенные факторы приводят к ускоренному износу подшипниковых узлов приводных двигателей, выжиганию смазки подшипников, повышению шумов и вибраций электродвигателя, снижению эксплуатационных

характеристик электропривода в целом (энергетической эффективности, надежности, совместимости и других). В конечном счете, из-за повышенной интенсивности подшипниковых токов может происходить разрушение подшипниковых узлов и выход приводных электродвигателей из строя.

### Способы устранения подшипниковых токов

Для устранения подшипниковых токов с целью повышения эксплуатационных характеристик современных электроприводов с полупроводниковыми преобразователями можно использовать различные подходы. Эти подходы можно разделить на конструкторские, структурные и алгоритмические. Наиболее эффективными средствами являются следующие:

1. *Изоляция подшипников и частей корпуса электродвигателя.* С целью изоляции корпуса, крышек и подшипниковых узлов электродвигателя могут использоваться неметаллические вкладыши и прокладки.

2. *Совершенствование конструкций и материалов двигателя.* В двигателях с искусственной вентиляцией корпус электродвигателя может изготавливаться из неметаллических современных материалов.

3. *Совершенствование конструкций и материалов подшипниковых узлов.* Подшипниковые узлы могут быть изготовлены из композитных материалов.

4. *Активный магнитный подвес.* Подшипники скольжения и качения, имеющие механический контакт между вращающимися и неподвижными частями, могут быть заменены на активный магнитный подвес.

5. *Непроводящие передаточные устройства.* Для исключения протекания подшипниковых токов через вал исполнительного механизма могут быть использованы непроводящие муфты, редукторы и др.

6. *Синусоидальные фильтры и другие типы моторных фильтркомпенсирующих устройств.* На выходе автономный инвертор полупроводникового преобразователя имеет импульсную форму напряжения. Для преобразования импульсного напряжения в квазисинусоидальное и снижения интенсивности электромагнитных полей вокруг моторного кабеля целесообразно использовать моторные фильтркомпенсирующие устройства, например, синусоидальные фильтры, моторные дроссели и другие.

7. *Короткие моторные кабели.* Для снижения перенапряжений на вводных клеммах приводного двигателя, снижения интенсивности электромагнитных полей вокруг моторного кабеля и, как следствие, величины подшипниковых токов при построении электропривода, целесообразно добиваться минимальной длины моторного кабеля.

8. *Двигатели низкого напряжения.* Для снижения паразитного напряжения в электроприводах целесообразно использовать энергосберегающие двигатели низкого напряжения.

Также можно выделить дополнительный комплекс способов исключения или снижения величины подшипниковых токов, например, использование стабилизаторов подшипниковых токов, специализированных силовых кабелей между полупроводниковым преобразователем и приводным электродвигателем, двигателей с большим числом пар полюсов, модификация алгоритма формирования выходного напряжения преобразователя и др.

### Заключение

Проблема возникновения подшипниковых токов является одной из основных проблем при использовании электроприводов с полупроводниковыми преобразователями. Подшипниковые токи оказывают негативное влияние на целую совокупность основных эксплуатационно-технических параметров регулируемого электропривода, в частности, энергетическую эффективность, надежность и другие. Проблема подшипниковых токов может решаться конструкторскими, структурными и алгоритмическими способами на различных этапах проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов с регулируемыми электроприводами.

В современных условиях, когда полупроводниковые преобразователи стали неотъемлемой частью электроприводов, устранение подшипниковых токов целесообразно решать в рамках общего подхода к обеспечению энергетической совместимости преобразователя и приводного электродвигателя.

В общем случае проблема энергетической совместимости заключается в необходимости согласования энергетических режимов работы и мощностей источников электрической энергии, сетей электроснабжения и электроприводов с ПП в статических и динамических режимах работы в автономных и децентрализованных электроэнергетических системах. Проблема обеспечения энергетической совместимости должна решаться системно в совокупности с задачами управления, энергоэффективности, надежности, электромагнитной совместимости, массогабаритов и других.

В данном случае, приводные электродвигатели характеризуются непрерывным режимом работы. В то же время, автономные инверторы ПП являются импульсными источниками электрической энергии, которые работают в дискретном режиме. Несогласованность режимов автономных инверторов, работающих в импульсном (дискретном) режиме, напряжение на выходе которых имеет импульсную форму, и ЭД, напряжение обмоток статора которого должно быть синусоидальным (не-

прерывным), приводит к появлению подшипниковых токов. Согласование дискретных энергетических режимов работы автономных инверторов ПП и непрерывных энергетических режимов работы приводных ЭД и устранение подшипниковых токов являются актуальными научно-техническими задачами, которые можно отнести к проблеме энергетической совместимости.

Также необходимо отметить, что в международных и национальных технических стандартах и нормативных документах различных стран, например, IEC 60034-17, IEC 60034-25, NEMA MG1 и других [12], приводятся обязательные требования и рекомендации по устранению подшипниковых токов электродвигателей, используемых в электроприводах с полупроводниковыми преобразователями. В отечественных технических нормах эти позиции отсутствуют. Это актуализирует вопрос гармонизации отечественных и международных технических норм в области современного электропривода.

### Литература

1. *Research of Bearing Voltage and Bearing Current in Induction Motor Drive System / Zhuxia Fan, Yongjian Zhi, Bingquan Zhu et al. // 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – Shenzhen, China, 2016. – P. 1195–1198. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522983*
2. *Akagi, H. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor / H. Akagi, S. Tamuramora // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21, no. 5. – P. 1459–1469. DOI: 10.1109/TPEL.2006.880239*
3. *Schiferl, R.F. Bearing Current Remediation Options / R.F. Schiferl, M.J. Melfi // IEEE Industry Applications Magazine. – 2004. – Vol. 10, no. 4. – P. 40–50. DOI: 10.1109/MIA.2004.1311162*
4. *Chen, S. Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters / S. Chen, T.A. Lipo, D. Fitzgerald // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1996. – Vol. 11, no. 1. – P. 25–32. DOI: 10.1109/60.486572*
5. *Muetze, Annette. Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW / Annette Muetze, Andreas Binder // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1999. – Vol. 54, no. 3. – P. 1614–1622. DOI: 10.1109/TIE.2007.894698*
6. *Link, P.J. Minimizing Electric Bearing Currents in ASD Systems / P.J. Link // IEEE Industry Applications Magazine. – 1999. – Vol. 5, no. 4. – P. 55–66. DOI: 10.1109/2943.771367*
7. *Пустоветов, М.Ю. Помехи в частотно-регулируемом электроприводе переменного тока / М.Ю. Пустоветов, Л.И. Вербицкий // Труды всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012». Ростов-на-Дону. – Ростов н/Д.: Ростов. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – С. 414–416.*
8. *Крылов, Ю.А. Исследование причин повреждения электродвигателя типа ДВИ-630-1500 / Ю.А. Крылов, Ю.Н. Самородов // Электрические станции. – 2008. – № 7. – С. 58–61.*
9. *Курмакаев, В.М. Проблемы диагностирования электроэрозионного состояния оборудования электрических станций / В.М. Курмакаев // Новое в российской электроэнергетике. – 2016. – № 4. – С. 6–21.*
10. *Sharana, Reddy. Simulation and Analysis of Common Mode Voltage, Bearing Voltage and Bearing Current in Two-level and Three-level PWM Inverter Fed Induction Motor Drive with Long Cable / Sharana Reddy, B. Basavaraja // International Conference on Power and Advanced Control Engineering. – Bangalore. – 2015. – С. 221–226. DOI: 10.1109/ICPAC.2015.7274947*
11. *Васильев, Б.Ю. Жуковский Ю.Л. Энергосбережение и энергоэффективность в промышленности / Б.Ю. Васильев, Ю.Л. Жуковский. – СПб.: Энергетика, 2016. – 214 с.*
12. *Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода / Б.Ю. Васильев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.*
13. *Kalaiselvi, J. Bearing Currents and Shaft Voltage Reduction in Dual-inverter-fed Open-end Winding Induction Motor with Reduced CMV PWM Methods / J. Kalaiselvi, S. Srinivas // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 62, no. 1. – P. 144–152. DOI: 10.1109/TIE.2014.2336614*
14. *Research on Electrostatic Shield for Discharge Bearing Currents Suppression in Variable-frequency Motors / Jing Quan, Baodong Bai, Yu Wang, Weifeng Liu // International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2014. – P. 139–143. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7013453*
15. *Hirofumi Akagi. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor / Hirofumi Akagi, Shunsuke Tamura // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21, no. 5. – P. 1459–1469. DOI: 10.1109/TPEL.2006.880239*
16. *A Complete Excitation-shaft-bearing Model to Overcome the Shaft Induced Voltage and Bearing Current / Reza Kazemi Golkhandan, Mohammad Tavakoli Bina, Masoud Aliakbar Golkar, Mohsen Jolar // Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. – 2011. – P. 362–366. DOI: 10.1109/PEDSTC.2011.5742447*
17. *Mitigation of Bearing Current and Shaft Voltage Using Five Level Inverter in Three Phase Induction Motor Drive with SPWM Technique / Rajendra K. Dhattrak, Rajesh K. Nema, Soubhagya Kumar Dash, Dinesh M. Deshpande // International Conference Industrial Instrumentation and Control. – 2015. – P. 1184–1189. DOI: 10.1109/IIC.2015.7150927*
18. *Martin Schuster. Comparison of Different*

*Inverter-fed AC Motor Types Regarding Common-mode Bearing Currents / Martin Schuster, Andreas Binder // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – 2015. – P. 2762–2768. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310047*

19. *Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages / J. Erdman,*

*R.J. Kerkmann, D. Schlegel, G. Skibinski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1996. – Vol. 32, no. 2. – P. 250–259. DOI: 10.1109/28.491472*  
20. *Muetze, A. Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors / A. Muetze // Technische Universitaet Darmstadt. – 2004. – 267 с.*

**Васильев Богдан Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электромеханика», Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; vasilev.bu@yandex.ru.

**Козярук Анатолий Евтихиевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электромеханика», Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург; kozjaruk@mail.ru.

Поступила в редакцию 5 августа 2016 г.

DOI: 10.14529/power160311

## BEARING CURRENTS OF DRIVING MACHINES IN DRIVES WITH SEMICONDUCTOR TRANSFORMERS

**B.Yu. Vasilev**, vasilev.bu@yandex.ru,

**A.E. Kozyaruk**, kozjaruk@mail.ru

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

A common problem of electric drives with semiconductor converters is an accelerated wear of the drive motor bearing units. This wear is caused by generation of bearing currents in the drive motor, which can have a continuous or permanent impact on the bearing assemblies.

The authors of this paper have analyzed the causes of bearing currents at driving machines of modern electric drives. The main types of bearing currents have been identified and described including their characteristics. We provide description of the main negative impact, long and short-term consequences of bearing current impact. The basic methods of measurement and control of bearing currents are provided, too. The paper offers means of minimizing bearing currents, analysis of their effectiveness, recommendations for their implementation at modern electric drives. It concerns the main international regulations specifying permissible values of bearing currents and preventive methods. The authors offer recommendations on development of this specific national regulatory framework.

Further studies of bearing currents generated at semiconductor drive motors with frequency converters will be connected with mathematical models simulating their generation dependent on operation modes of the autonomous inverter, motor, ground circuit, with their simulation analysis as well as with algorithmic methods aimed at their elimination.

*Keywords: bearing current, electric drive, electric motor, semiconductor converter, energy compatibility.*

### References

1. Zhuxia Fan, Yongjian Zhi, Bingquan Zhu, Guanglin Yan, Yu Shi. Research of bearing voltage and bearing current in induction motor drive system. *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC)*, Shenzhen, China, 2016, pp. 1195–1198. DOI: 10.1109/AP EMC.2016.7522983
2. Akagi H., Tamuramore S. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, vol. 21, no. 5, pp. 1459–1469. DOI: 10.1109/TPEL.2006.880239
3. Schiferl R.F., Melfi M.J. Bearing Current Remediation Options. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2004, vol. 10, no. 4, pp. 40–50. DOI: 10.1109/MIA.2004.1311162

4. Chen S., Lipo T.A., Fitzgerald D. Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1996, vol. 11, no. 1, pp. 25–32. DOI: 10.1109/60.486572
5. Annette Muetze, Andreas Binder. Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 54, no. 3, pp. 1614–1622. DOI: 10.1109/TIE.2007.894698
6. Link P.J. Minimizing Electric Bearing Currents in ASD Systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 55–66. DOI: 10.1109/2943.771367
7. Pustovetov M.Yu., Verbitskiy L.I. [Interference in the Variable Frequency AC Drive]. *Trudy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Transport-2012" Rostov-na-Donu: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya* [Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference "Transport 2012" Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Engineering], 2012, pp. 414–416. (in Russ)
8. Krylov Yu.A., Samorodov Yu.N. [Research into Causes of Damage to DVI-630-1500 Motor]. *Elektricheskie stantsii* [Power Stations], 2008, no. 7, pp. 58–61. (in Russ)
9. Kurmakaev V.M. [Problems of Diagnosing State of Power Station Equipment]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike* [New Issues in Russian Power Industry], 2016, no. 4, pp. 6–21. (in Russ)
10. Sharana Reddy, Basavaraja B. Simulation and Analysis of Common Mode Voltage, Bearing Voltage and Bearing Current in Two-level and Three-level PWM Inverter Fed Induction Motor Drive with Long Cable. *International Conference on Power and Advanced Control Engineering*, Bangalore, 2015, pp. 221–226. DOI: 10.1109/ICPACE.2015.7274947
11. Vasil'ev B.Yu., Zhukovskiy Yu.L. *Energoberezhenie i energoeffektivnost' v promyshlennosti* [Energy Saving and Energy Efficiency in Industry]. St. Petersburg, Energetika Publ., 2016. 214 p.
12. Vasil'ev B.Yu. *Elektroprivod. Energetika elektroprivoda* [Electric Drive. Energetics of Electric Drive]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2015. 268 p.
13. Kalaiselvi J., Srinivas S. Bearing Currents and Shaft Voltage Reduction in Dual-inverter-Fed Open-end Winding Induction Motor with Reduced CMV PWM Methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, no. 1, pp. 144–152. DOI: 10.1109/TIE.2014.2336614
14. Jing Quan, Baodong Bai, Yu Wang, Weifeng Liu. Research on Electrostatic Shield for Discharge Bearing Currents Suppression in Variable-frequency Motors. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2014, pp. 139–143. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7013453
15. Hirofumi Akagi, Shunsuke Tamura. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, vol. 21, no. 5, pp. 1459–1469. DOI: 10.1109/TPEL.2006.880239
16. Reza Kazemi Golkhandan, Mohammad Tavakoli Bina, Masoud Aliakbar Golkar, Mohsen Jokar. A Complete Excitation-shaft-bearing Model to Overcome the Shaft Induced Voltage and Bearing Current. *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 2011, pp. 362–366. DOI: 10.1109/PEDSTC.2011.5742447
17. Rajendra K. Dhattrak, Rajesh K. Nema, Soubhagya Kumar Dash, Dinesh M. Deshpande. Mitigation of Bearing Current and Shaft Voltage Using Five Level Inverter in Three-Phase Induction Motor Drive with SPWM Technique. *International Conference Industrial Instrumentation and Control*, 2015, pp. 1184–1189. DOI: 10.1109/IIC.2015.7150927
18. Martin Schuster, Andreas Binder. Comparison of Different Inverter-fed AC Motor Types Regarding Common-mode Bearing Currents. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2015, pp. 2762–2768. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310047
19. Erdman J., Kerkmann R.J., Schlegel D., Skibinski G. Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 250–259. DOI: 10.1109/28.491472
20. Muetze A. Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors. *Technische Universitaet Darmstadt*, 2004. 267 p.

*Received 5 August 2016*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Васильев, Б.Ю. Подшипниковые токи приводных машин в электроприводах с полупроводниковыми преобразователями / Б.Ю. Васильев, А.Е. Козярук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 93–100. DOI: 10.14529/power160311

### FOR CITATION

Vasilev B.Yu., Kozyaruk A.E. Bearing Currents of Driving Machines in Drives with Semiconductor Transformers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 93–100. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160311