

* * *

Обеспечение стабильности электромагнитного момента вентильного двигателя на основе синхронной машины с постоянными магнитами

ВОРОНИН С.Г., КУРНОСОВ Д.А., ШАБУРОВ П.О.

Рассматриваются пути обеспечения постоянства электромагнитного момента вентильного двигателя на основе синхронной машины с постоянными магнитами (ВД), даже в случае обрыва питания одной из фазных обмоток двигателя или отказа одного из силовых каналов питания. Получены выражения для формирования фазных токов, позволяющие решить практические задачи уменьшения или исключения пульсаций момента двигателя и обеспечить его работоспособность. Описанные алгоритмы формирования токов опробованы и нашли практическое применение при создании электроприводов с повышенными требованиями по обеспечению надежности.

Ключевые слова: *вентильный двигатель, постоянство электромагнитного момента, оптимальное регулирование фазных токов*

При разработке электроприводов различного назначения часто ставится задача обеспечения постоянства электромагнитного момента двигателя в зависимости от угла поворота ротора в процессе его вращения и сохранения этого свойства привода при единичных отказах. В [1] описан один из

Ways are considered in which it is possible to achieve a constant electromagnetic torque of a converter-fed motor constructed on the basis of a synchronous machine with permanent magnets even in the case if power supply is disconnected from one of the motor phase windings or if one of the power supply system's principal channels fails. Expressions for shaping the phase currents are obtained, using which it is possible to solve practical tasks of decreasing or excluding pulsations of the motor torque and secure its serviceability. The described current shaping algorithms have been approbated and found practical application in constructing electric drives complying with enhanced reliability requirements.

Key words: *converter-fed motor, constancy of electromagnetic torque, optimal control of phase currents*

путей решения такой задачи применительно к электроприводу на основе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, имеющему обратную связь по положению ротора, при внезапном отключении питания в одной из фазных обмоток. Отключение может произойти, например,

из-за обрыва обмотки или выхода из строя одного из силовых ключей преобразователя напряжения, от которого питается двигатель. При этом показано, что если каждая фаза трехфазного двигателя питается от автономного мостового инвертора напряжения, как представлено на рис. 1, то при обрыве силового ключа в одном из инверторов можно сформировать токи оставшихся фаз так, что электромагнитный момент двигателя будет стабильным, т.е. не зависимым от угла поворота ротора. Для случая синусоидальной формы фазных ЭДС выражения фазных токов, обеспечивающих стабильность угловой моментной характеристики, имеют вид:

$$i_l(a) = \frac{(n/2) \sin(a + 2p(l-1)/n)}{\prod_{j=1, l' \neq j}^n \sin^2(a + 2p(l-1)/n)}, \quad (1)$$

где n – число фаз двигателя; l – номер исправных фаз; j – номер отказавшей фазы; a – угол поворота ротора в электрических координатах.

Однако в реальных условиях у двигателей с возбуждением от постоянных магнитов трудно обеспечить синусоидальную форму фазной ЭДС, в некоторых случаях она может сильно отличаться от синусоиды, приближаясь к трапеции. Поэтому в настоящей статье предпринята попытка решения задачи обеспечения стабильности угловой моментной характеристики привода при произвольной форме фазных ЭДС. Единственным ограничением является обеспечение периодичности ЭДС и её симметрии.

Обеспечение постоянства электромагнитного момента при отсутствии отказов. Предположим, что форма фазных ЭДС двигателя несинусоидальна, но

является симметричной периодической функцией и описывается выражением

$$e_l(a) = F_1(a + 2p(l-1)/n), \quad (2)$$

где $l=1, 2, 3, \dots, n$ – номер фазы.

Найдём форму фазного тока, при которой электромагнитный момент двигателя в процессе вращения ротора в симметричном режиме, когда исправны все обмотки, будет постоянным. Предположим, что фазный ток, удовлетворяющий этому требованию, также является симметричной периодической функцией

$$i_l(a) = F_2(a + 2p(l-1)/n). \quad (3)$$

В соответствии с общей теорией электромеханического преобразования энергии для обеспечения минимума электрических потерь синусоидальные ЭДС и ток должны совпадать по фазе. Тогда относительное значение электромагнитного момента двигателя определяется соотношением

$$m(a) = \frac{n}{\omega} \sum_{l=1}^n e_l(a) i_l(a) = \frac{n}{\omega} \sum_{l=1}^n F_1(a + 2p(l-1)/n) F_2(a + 2p(l-1)/n). \quad (4)$$

Отсюда можно заключить, что при выполнении условия

$$e_l(a) i_l(a) = \sin^2(a + 2p(l-1)/n) \quad (5)$$

мгновенное значение электромагнитного момента двигателя будет постоянным и при несинусоидальной форме ЭДС. Следовательно, в общем случае для обеспечения неизменности электромагнитного момента двигателя при несинусоидальной ЭДС фазный ток должен изменяться согласно выражению

$$i_l(a) = F_2(a + 2p(l-1)/n) = \frac{\sin^2(a + 2p(l-1)/n)}{F_1(a + 2p(l-1)/n)}. \quad (6)$$

На рис. 2 и 3 приведены кривые ЭДС и фазных токов, рассчитанных по (6), для симметричного режима работы трехфазного двигателя при форме ЭДС, близкой к трапецеидальной, описываемой, например, выражением [2]:

$$e_l(a) = F_1(a + 2p(l-1)/n) = \sqrt[5]{\sin^2(a + 2p(l-1)/n)}.$$

Очевидно, полученное выражение для тока не является единственным решением задачи. Действительно, если фазная ЭДС описывается, хотя и практически не реализуемой, но формально удовлетворяющей принятым ранее условиям периодичности и симметрии функции вида

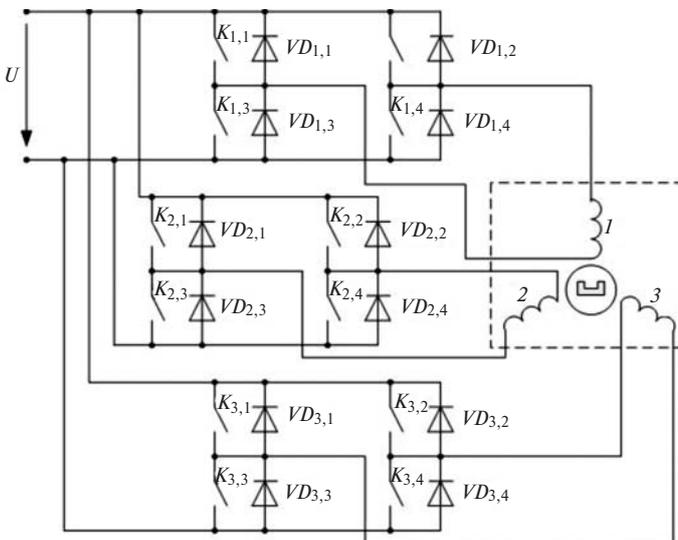


Рис. 1. Схема трехфазного двигателя с автономным питанием каждой фазы

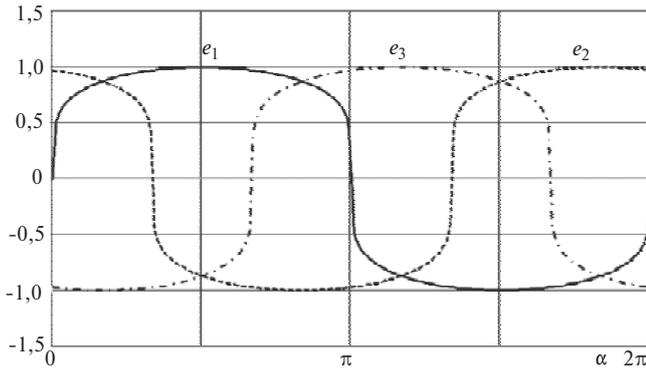


Рис. 2. Кривые ЭДС для симметричного режима работы двигателя

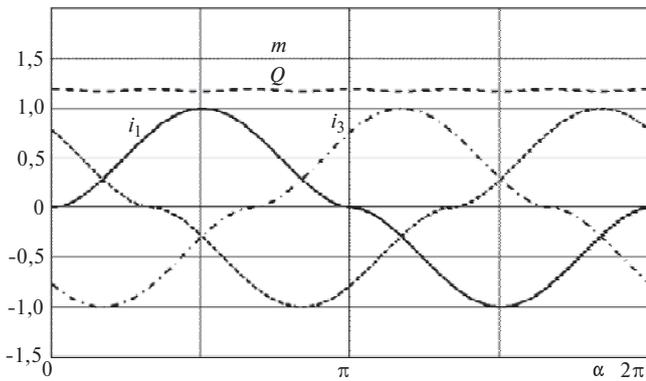


Рис. 3. Кривые фазных токов, электромагнитного момента и мгновенного значения электрических потерь двигателя для симметричного режима работы

$$F_1(a) = \int_0^{\pi} \begin{matrix} 1, & a \hat{=} (0,p); \\ 1, & a \hat{=} (p,2p), \end{matrix} da \tag{7}$$

то для обеспечения неизменности момента ток должен иметь ту же форму, что и ЭДС, т.е. в течение половины периода не менять своего значения, а его амплитуда должна составлять 0,5 отн. ед. Если определить средние относительные значения электрических потерь в фазе по выражению

$$Q_l = \frac{1}{p} \int_0^p i_l^2(a) da,$$

то при формировании тока согласно выражению

$$F_2(a) = \int_0^{\pi} \begin{matrix} 0,5, & a \hat{=} (0,p); \\ 0,5, & a \hat{=} (p,2p) \end{matrix} da$$

потери окажутся в полтора (3/2) раза меньше, чем при формировании тока согласно выражению (6) т.е., соответственно, 0,25 и 0,375 отн. ед.

Поставим задачу определения такого закона изменения фазных токов для симметричного режима, который помимо постоянства момента обеспечивает также минимум электрических потерь в процес-

се работы двигателя. В соответствии с (6) выражения для фазных токов запишем в виде

$$i_l(a) = \frac{i_{la}(a) \sin^2(a + 2p(l-1)/n)}{F_1(a + 2p(l-1)/n)}, \tag{8}$$

где $i_{la}(a)$ – коэффициент (аналог переменной амплитуды фазных токов), подлежащий оптимальной настройке. Потребуем постоянства электромагнитного момента:

$$m(a) = \sum_{l=1}^n \dot{a} i_{la}(a) \sin^2(a + 2p(l-1)/n) = n/2, \tag{9}$$

а также минимума мгновенного значения электрических потерь:

$$Q(a) = \sum_{l=1}^n \frac{n \dot{e} i_{la}(a) \sin^2(a + 2p(l-1)/n)}{F_1(a + 2p(l-1)/n)} \dot{u} = \min. \tag{10}$$

Для определения оптимальных значений «амплитуд» фазных токов воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа [3]. Проведем расчет для трехфазного двигателя. Функция Лагранжа будет иметь вид

$$L(i_{1a}, i_{2a}, i_{3a}, l) = \sum_{l=1}^3 \frac{\dot{a} i_{la}(a) \sin^2(a + 2p(l-1)/3)}{F_1(a + 2p(l-1)/3)} + \lambda \sum_{l=1}^3 \dot{a} i_{la}(a) \sin^2(a + 2p(l-1)/3) - 1,5 \frac{\dot{u}}{\dot{u}}$$

где λ – неопределенный множитель.

Для поиска экстремума функции Лагранжа приравняем частные производные нулю:

$$\frac{\partial L(i_{1a}, i_{2a}, i_{3a}, l)}{\partial i_{la}} = 2 i_{la} \left(\frac{\dot{a} \sin^2(a + 2p(l-1)/3)}{F_1(a + 2p(l-1)/3)} + \lambda \sin^2(a + 2p(l-1)/3) \right) = 0,$$

где $l=1, 2, 3$.

Решение задачи оптимизации (9) и (10) для $n=3$ будет следующим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(i_{1a}, i_{2a}, i_{3a}, l)}{\partial l} &= \\ &= \sum_{l=1}^3 \dot{a} i_{la}(a) \sin^2(a + 2p(l-1)/3) - 1,5 = 0, \\ i_{la}(a) &= \frac{3 [F_1(a + 2p(l-1)/3)]^2}{2 \sin^2(a + 2p(l-1)/3) \sum_{l=1}^3 [F_1(a + 2p(l-1)/3)]^2}. \end{aligned} \tag{11}$$

Можно показать, что найденное решение экстремальной задачи является единственным и обеспечивает минимум функции электрических потерь

Q , так как матрица вторых производных Гессе минимизируемого функционала является положительно-определенной во всем диапазоне изменения α . С учетом (8) и (11) выражения для фазных токов примут вид

$$i_l(\alpha) = \frac{3F_1(\alpha + 2p(l-1)/3)}{2 \sum_{l=1}^3 [F_1(\alpha + 2p(l-1)/3)]^2}, \quad l=1, 2, 3. \quad (12)$$

Последние выражения легко обобщаются на n -фазный случай:

$$i_l(\alpha) = \frac{nF_1(\alpha + 2p(l-1)/n)}{2 \sum_{l=1}^n [F_1(\alpha + 2p(l-1)/n)]^2}, \quad l = \overline{1, n}. \quad (13)$$

В частном случае при $F_1(\alpha) = \sin(\alpha)$

$$i_{la}(\alpha) = \frac{n}{2 \sum_{l=1}^n \sin^2(\alpha + 2p(l-1)/n)} = 1; \quad (14)$$

$$i_l(\alpha) = \frac{n \sin(\alpha + 2p(l-1)/n)}{2 \sum_{l=1}^n \sin^2(\alpha + 2p(l-1)/n)} = \sin(\alpha + 2p(l-1)/n), \quad l = \overline{1, n}, \quad (15)$$

что соответствует общей теории электромеханического преобразования энергии.

Выражения (11) и (12) также подтверждают сделанное ранее предположение о форме и амплитуде фазных токов для случая трехфазного двигателя, когда ЭДС соответствует выражению (7), по которому форма фазных токов – прямоугольник с амплитудой 0,5 отн. ед.

На рис. 4 приведены кривые фазных токов, рассчитанные по (12) при трапецеидальной форме ЭДС. Средние значения электрических потерь в фазной обмотке оказались для этого случая равны-

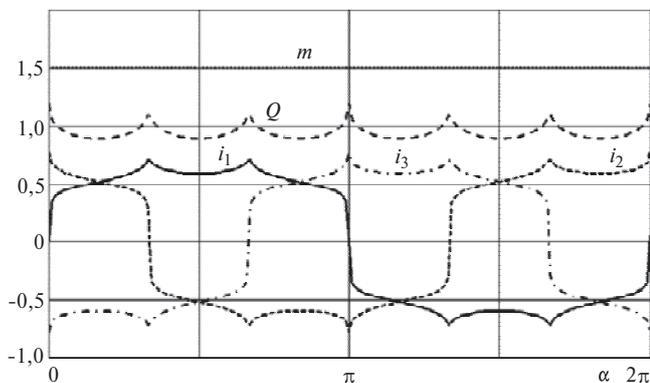


Рис. 4. Кривые фазных токов, электромагнитного момента и мгновенного значения электрических потерь для симметричного режима работы при оптимальной настройке фазных токов

ми 0,315 отн. ед., что на 25% меньше потерь при форме тока, полученной в соответствии с (6), и на 20% больше минимального возможного значения 0,25 при прямоугольной форме фазных ЭДС.

Обеспечение постоянства электромагнитного момента при аварийных режимах. Предположим, что в силовом канале одной из фаз произошел отказ, приведший к её обесточиванию [3], двигатель в момент отказа работал в штатном режиме и ток в каждой фазе изменялся согласно выражению (6). Тогда относительное значение электромагнитного момента двигателя может быть представлено в том же виде, что и для случая синусоидальной ЭДС:

$$m(\alpha) = \sum_{l=1}^{n-1} \sin^2(\alpha + 2p(l-1)/n). \quad (16)$$

Напомним, что в этом случае из-за нарушения симметрии обмотки при изменении угла поворота ротора относительно статора момент $m(\alpha)$ будет меняться. Компенсировать пульсации момента, обусловленные возникшей несимметрией, можно, как и для случая синусоидальной ЭДС, настройкой переменного коэффициента $i_{la}(\alpha)$ в выражении (8). Примем также, что требуемое относительное значение момента равно значению, которое двигатель имеет в штатном n -фазном режиме, т.е. $m(\alpha) = n/2$. Тогда закон изменения «амплитуды» фазных токов соответствует выражению

$$i_{la}(\alpha) = \frac{n}{2 \sum_{l=1, l^1}^n \sin^2(\alpha + 2p(l-1)/n)}. \quad (17)$$

Умножим значение «амплитуды» тока (17) на выражение фазного тока (6) и получим полный закон изменения мгновенного значения фазного тока двигателя при обрыве одной фазной обмотки и несинусоидальной ЭДС:

$$i_l(\alpha) = \frac{3 \sin^2(\alpha + 2p(l-1)/n)}{2 F_1(\alpha + 2p(l-1)/n) \sum_{l=1, l^1}^n \sin^2(\alpha + 2p(l-1)/n)}. \quad (18)$$

В данном случае $l, j = \overline{1, n}; l^1 j$, где j – номер силового канала фазы, в которой произошел отказ. На рис. 5 приведены кривые фазных токов трехфазного двигателя с одной обесточенной фазной обмоткой, рассчитанные по (18). Такой закон изменения тока обеспечивает неизменность электромагнитного момента двигателя в процессе вращения ротора, но по сравнению с симметричным оптимальным режимом работы двигателя существенно (в три раза) возрастают электрические потери ($Q_l = 0,886$ отн. ед.).

Получим закон изменения фазных токов аналогично симметричному режиму, который помимо постоянства момента обеспечивает также минимум электрических потерь в процессе работы двигателя, но уже в несимметричном режиме, т.е. в случае обесточивания одной из секций. Синтез проводится по тем же соотношениям (8)–(15), но при исключении из расчетов отказавшего силового канала. Решение оптимизационной задачи для этого случая имеет вид

$$i_l(a) = \frac{n F_{1e} \frac{\partial}{\partial a} + \frac{2p(l-1)\ddot{\alpha}}{n}}{2 \sum_{l=1, l' \neq l}^3 \frac{\partial}{\partial a} F_{1e} \frac{\partial}{\partial a} + \frac{2p(l-1)\ddot{\alpha}}{n}}, \quad (19)$$

где $l, j = \overline{1, n}$; $l' \neq j$, где j – номер силового канала фазы, в которой произошёл отказ.

Графики величин для несимметричного режима работы двигателя с оптимальной настройкой токов показаны на рис. 6.

Оптимальный закон изменения фазных токов для несимметричного режима работы двигателя

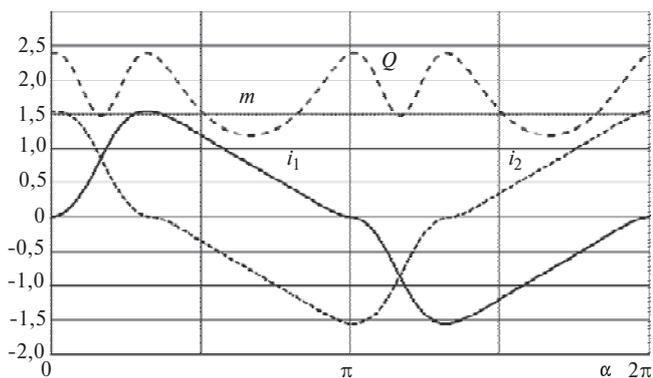


Рис. 5. Кривые фазных токов, электромагнитного момента и мгновенного значения электрических потерь двигателя для несимметричного режима работы

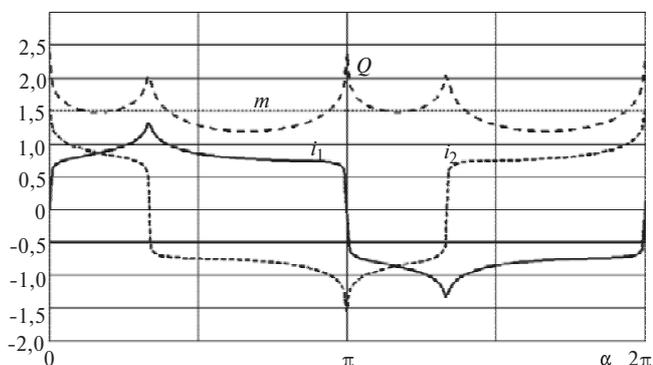


Рис. 6. Кривые фазных токов, электромагнитного момента и мгновенного значения электрических потерь двигателя для несимметричного режима работы при оптимальной настройке фазных токов

обеспечивает существенно меньшее значение электрических потерь (0,72 отн. ед.) по сравнению с неоптимальным законом (18), но по сравнению с симметричным режимом при оптимальной настройке формы фазных токов (13) потери в несимметричном режиме работы двигателя в 2,25 (9/4) раза выше. В предельном случае при прямоугольных фазных ЭДС потери для этого режима достигают своего минимально возможного значения 0,5625 (9/16) отн. ед.

Практическая реализация алгоритмов формирования фазных токов ВД. Разработанные алгоритмы предполагают реализацию векторного токового управления электроприводом, когда ток в фазных обмотках изменяется по заданному закону в функции углового положения ротора относительно статора. При синусоидальной форме ЭДС и в случае отсутствия отказа формируется синусоидальный закон изменения фазного тока. Если форма ЭДС отличается от синусоидальной, то в симметричном режиме ток формируется согласно (13), а при наличии отказа – по (19), но в любом случае так, чтобы ЭДС и ток совпадали по фазе. Для этого в силовую цепь каждой фазной обмотки должен быть включён датчик тока (на рис. 1 не показан), а на роторе установлен цифровой датчик угла или энкодер. Амплитуда тока по сигналу управления электроприводом, соответствующему заданному значению электромагнитного момента двигателя, формируется микропроцессорным цифровым устройством управления. Последнее, сопоставляя с заданным значением амплитуды тока сигналы с датчиков тока и датчика угла, осуществляет ШИМ регулирование напряжения на обмотке так, чтобы реализовать требуемую согласно (13) зависимость фазного тока от угла поворота ротора. С помощью датчиков тока выявляется также и номер силового канала, в котором произошёл отказ, так как ток в нём будет равен нулю или, по крайней мере, существенно отличаться от заданного. В случае выявления отказа алгоритм формирования фазных токов перестраивается на несимметричный режим, т.е. по выражению (19).

Изложенные в статье принципы были реализованы при разработке электропривода для автоматизации технологических процессов в атомной промышленности [4, 5], при этом был использован трёхфазный двигатель. Представленная в статье схема реализована в этом приводе, применительно к которому рассчитаны также кривые токов и моментов.

Для обеспечения постоянства электромагнитного момента ВД в функции угла поворота ротора при минимальных электрических потерях в обмотке статора для случая несинусоидальной ЭДС в

симметричном и несимметричном режимах работы двигателя форма фазного тока должна определяться согласно выражениям (13) и (19) соответственно. Практическая реализация электропривода на основе указанных алгоритмов векторного управления достаточно просто осуществляется с применением современных компактных цифровых информационных и управляющих элементов и позволяет существенно повысить его надёжность и живучесть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шабуров П.О., Воронин С.Г., Курносков Д.А.** Обеспечение работоспособности электропривода с вентильным двигателем при единичных отказах в силовом канале. — Электричество, 2010, № 11.
2. **Сильвестров А.Н., Чинаев П.И.** Идентификация и оптимизация автоматических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Батищев Д.И.** Методы оптимального проектирования. — М.: Радио и связь, 1984.
4. **Пат. № 2401500 (РФ).** Способ обеспечения живучести многофазного вентильного двигателя/С.Г. Воронин, П.О. Шабуров, Д.В. Коробатов и др. БИ, 2010, № 28.
5. **Воронин С.Г., Кононов А.Н.** Электропривод для управления запорной арматурой в атомной промышленности. — Изв. РАЭН, 2012, № 2.

[28.02.13]

Авторы: Воронин Сергей Григорьевич окончил факультет электрификации Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства в 1964 г. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию в МЭИ. Зав. кафедрой электромеханики и электромеханических систем Южно-Уральского гос. университета (ЮУрГУ).

Курносков Дмитрий Александрович окончил приборостроительный факультет Челябинского политехнического института в 1981 г. Кандидатскую диссертацию защитил в Челябинском государственном техническом университете в 1991 г. Доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ.

Шабуров Павел Олегович окончил энергетический факультет ЮУрГУ по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов» в 2005 г. В 2010 г. в ЮУрГУ защитил кандидатскую диссертацию «Интеллектуальный электропривод на основе вентильного двигателя для запорной арматуры». Доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ.