

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-91-99

**Корчагин О.А.**

ООО НПФ «Политех»

E-mail: koroleg@inbox.ru

## КОНСТРУКТИВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА И ЗУБЧАТЫМ БЕЗОБМОТОЧНЫМ РОТОРОМ

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы обоснования и выбора базовых конструктивных соотношений индукционных машин с однозубцовыми обмотками, которые могут входить в состав вновь разрабатываемых мехатронных систем.

Обоснованные в данной работе соотношения могут быть применены при разработке новых мехатронных систем, особенно при часто встречающейся на практике задаче разработки мехатронных модулей под заданные габариты, что требует разработки как двигателей, так и новых датчиков угла и скорости. Кроме того, еще более актуальной такая задача становится при задании жестких условий эксплуатации, таких как низкие и высокие температуры, удары, вибрации, работа в погружных сервоприводах, заполненных маслом. Все это делает затруднительным или невозможным использование ряда других, неэлектромеханических датчиков, таких, например, как оптические, дискретные датчики Холла, что дополнительно сужает номенклатуру покупных изделий для встраивания в заданные габариты модуля.

Рассмотренные соотношения позволяют реализовывать датчики не только под разные габариты изделий, но и учитывать назначение, требования по точности, проектировать измерители с разной электрической редуцией, с разным числом фаз. Дополнительным преимуществом разработки датчиков по указанным соотношениям является технологичность, простота и скорость разработки и возможность быстрого запуска в производство.

Кроме того, выведенные соотношения позволяют проектировать не только датчики угла, но и датчики скорости, а также электродвигатели и генераторы, что может быть востребовано в ряде специальных случаев, например, при необходимости минимизации момента инерции ротора двигателя, и для построения высокоскоростных машин.

**Ключевые слова:** электромашины с сосредоточенными обмотками, индукторные электромашины, соотношения между зубцами статора и ротора индукторных электрических машин, редуктоины, электромашины с пассивным ротором.

**Введение.** Далее в данной статье рассматриваются электромашины с первичной и вторичной обмоткой на статоре с зубчатым безобмоточным ротором. Существуют различная терминология при их описании. В [1, 2] данные электромашины классифицируются как «субсинхронные», далее в рамках данного класса рассматриваются различные типы электродвигателей с различным числом пар полюсов первичных и вторичных обмоток статора. Отметим, что также широко используются другие обозначения для данного класса двигателей, в [3] используется термин «индукторные двигатели», а в [4] используется термин электрические машины с «электромагнитной редуцией». Традиционно данные электромашины рассматриваются с общим случае с распределенной обмоткой, и как частный случай с сосредоточенной. В [1, 2] приведены соотношения между зубцами статора и ротора таких электромашин с учетом пар полюсов первичной и вторичной обмотки. Заметим, что само название двигателя с «электромагнитной редуцией», указывает их назначение, такая электромашина

позволяет значительно понизить частоту вращения ротора по сравнению с частотой сети, что важно в неуправляемом электроприводе, так как позволяет исключить редуктор.

В данной статье построение данных электромашин рассматривается в приложении к использованию в мехатронных системах. Важность вопроса разработки новых изделий такого типа в составе мехатронного модуля вытекает из того, что актуальной задачей является разработка мехатронных модулей, встраиваемых в систему, что приводит к необходимости разработки всех элементов, как исполнительных, так и информационных, также под заданные габариты.

В настоящее время возможность электромагнитной редуки частоты питания электродвигателя не является определяющей. Действительно, предположим требуется построить тихходный мехатронный модуль. Распространенное в настоящее время использование инвертора с промежуточным электронным преобразованием частоты питания в звено постоянного тока позво-

ляет запитывать обмотки двигателя теми частотами, которые требуются по условиям его функционирования. При этом проблемы обеспечения качественных низких и сверхнизких скоростей в этом случае уходят в область проблем реализации схемы управления мехатронной системы и использования датчиков. Таким образом, для исполнительного двигателя мехатронного управляемого модуля важна не степень редукции частоты вращения, а энергетические характеристики, такие как развиваемые момент, мощность, к.п.д. и т.д., что определяет требуемые габариты. Отметим, что в энергетических характеристиках данный класс электромашин с пассивным зубчатым ротором скорее проиграет электродвигателям с возбуждением на постоянных магнитах. Тем не менее вопрос рассмотрения указанных электромашин актуален.

Отметим востребованность компоновки мехатронного модуля информационными электромашинами, даже при широком распространении различных бездатчиковых алгоритмов управления. Так в случае работы в широком диапазоне скоростей, при предъявлении требований при нулевой скорости, а также при необходимости разработки позиционных сервоприводов, необходимо в конструкции мехатронного модуля предусматривать датчики положения, а иногда, и датчики скорости.

При этом в случае необходимости использования мехатронного модуля в жестких условиях эксплуатации целесообразно применение электромеханических датчиков, которые позволяют работать не только при самых низких или высоких температурах, при сильных вибрациях и ударах, но и работать в погружных мехатронных модулях, заполненных маслом под давлением. Кроме того, электромеханические датчики при применении во вновь разрабатываемых изделиях имеют дополнительные преимущества, так как технологичны и просты в производстве, требуют минимум компонентов, могут быть достаточно быстро разработаны и запущены в производство.

Среди различных типов электромеханических датчиков выделим датчики редуктосины. Данные датчики имеют ряд преимуществ: минимальный момент инерции, малые габариты, пассивный ротор, что позволяет работать при любых углах поворота, отсутствие скользящих контактов, и как следствие надежность. Отметим, что СКВТ с возбуждением на роторе с использованием трансформатора также не имеют скользящих контактов, при этом имеют значительно большие осевые размеры, преимуществом редуктосина в этом случае является малый осевой раз-

мер датчика, что также упрощает его встраиваемость в конструкцию мехатронного модуля, а также повышает жесткость конструкции ротора.

Указанные характеристики датчиков редуктосинов делают их востребованным компонентом мехатронных модулей, и при их разработке могут быть использованы теоретические выкладки, разработанные для двигателей с электромагнитной редукцией, так как данные машины соответствуют друг другу по сути физического функционирования. Отметим, что и для редуктосина-датчика так же важна не степень редукции частоты вращения по отношению к частоте питающей сети, а важна степень редукции электрических сигналов в обмотке управления относительно механической частоты вращения ротора, которая зависит от числа зубцов ротора, так как эта характеристика напрямую влияет на точность датчика. В [1] на основе выведенных соотношений для субсинхронных двигателей рассматриваются соотношения между числом зубцов статора и ротора для синусно-косинусных индукционных редуктосинов. Примером работы, использующей данные соотношения субсинхронных электрических машин для рассмотрения датчиков-редуктосинов является [5]. В редуктосинах важными параметрами помимо числа зубцов ротора является число повторяющихся частей, что сильно сказывается при наличии эксцентриситета, кроме того необходимо учитывать число фаз, и другие характеристики, влияющие на форму выходного сигнала датчика, и его точность, что показано, например, в [6,7]. В данных работах рассматриваются вопросы построения датчиков, и приводятся наиболее рациональные и рекомендуемые для практики соотношения чисел зубцов статора и ротора, с дальнейшим анализом влияния числа повторяющихся частей или электрической редукции на точность. Отметим, что точность датчиков определяется, не только конструктивными соотношениями, но и алгоритмами обработки, а также режимами работы индукторных датчиков. Например, [8] рассмотрены редукционные фазовращатели, в том числе и редуктосины.

Заметим, что в данный класс электромашин помимо двигателей и редуктосинов входят и датчики скорости (тахогенераторы), которые также применяются в составе мехатронных модулей, что может быть востребовано при требованиях высокого качества регулирования как на низких скоростях вращения (позиционирование), так и при высоких скоростях, на которых уже невозможно получить качественный сигнал скорости, с индукторного датчика угла. Режимы работы индукторных датчиков приведены в [9].

Много работ и изобретений в данной области сосредоточено либо на повышении точности

за счет применения различных конструктивных мер датчиков с выбранными тем или иным образом соотношениями между зубцами статора и ротора [10–14]. Заметим, что вопрос повышения точности при разработке индукционного датчика для новой мехатронной системы не является единственным, на первый план при разработке новой системы могут выходить вопросы встраиваемости в новую систему, обеспечения требуемой электрической редукции, минимизации момента инерции, а, следовательно, разработчик мехатронной системы может выходить за рамки рекомендованных соотношений, соответствующих максимальной точности. Это возможно, так как на практике мехатронные модули крайне разнообразны по назначению, и реализация максимальной точности перемещения, на которую ориентированы многие работы, посвященные датчикам, на практике не является единственным критерием.

Действительно в случае построения позиционного сервопривода характеристика точности позиционирования является одной из основных. С другой стороны, в случае построения скоростных мехатронных модулей, например, привод насоса, позиционный режим вообще не требуется, но при этом может требоваться развитие максимального момента с нулевых скоростей при запрете движения в неправильную сторону. При такой постановке вопроса, не требуется высокоточный датчик главной обратной связи, но требуется датчик положения вала двигателя, для обеспечения максимального момента на любых скоростях (в том числе при запуске), так как реализация бездатчикового управления при таких требованиях становится проблемной.

В данной статье при сохранении общего со статьей [15] подхода рассмотрено обоснование общих конструктивных соотношений статора и ротора в индукторных электрических машинах с пассивным ротором, радиальным возбуждением и сосредоточенными обмотками, что расширяет возможности разработчика по проектированию встроенных в конструкцию мехатронных компонентов. Обоснованные в статье соотношения могут являться базой проектирования для последующих этапов расчета, особенно с учетом широкого распространения сеточных пакетов проектирования, в которых могут быть детально учтены требования назначения изделия, и промоделированы как электромагнитные параметры, так и достижимая точность.

#### Анализ соотношений между статором и ротором индукторных машин

При анализе соотношений для статора и ротора в данном классе машин будем исходить из следующих исходных положений:

- 1) электромашина имеет сосредоточенные обмотки на статоре;
- 2) ротор имеет зубцы, и не содержит источников намагничивающей силы, таких как магниты и обмотки возбуждения
- 3) статор имеет два типа обмоток: возбуждения и съема или управления (в зависимости от назначения машины датчик или двигатель соответственно);
- 4) возбуждение машины – радиальное.

Последний пункт требует дополнительного уточнения. Далее примем, что для рассматриваемых в данной статье электрических машин с сосредоточенной обмоткой при радиальном возбуждении машины каждый зубец статора формирует полюс системы возбуждения со знаком «+» или «-», что может быть обеспечено либо при использовании катушек возбуждения, либо магнитами. При этом неравномерное распределение числа витков по полюсам возбуждения не рассматривается, таким образом все полюса возбуждения одинаковы и отличаются только знаком созданного потока. По сути функционирования электромашины минимальная дискретная единица обмотки съема (управления) должна также охватывать как зуб с возбуждением «+», так и «-», то есть также два зубца статора. Далее воспользуемся выведенной в [15] зависимостью:

$$p = \frac{z}{km} (n \pm im) \quad (1),$$

где  $p$  – число пар полюсов ротора;  $z$  – число зубцов статора;  $m$  – число фаз статора;  $k$  – число зубцов в фазной группе;  $i$  – любое целое число;  $\frac{n}{m}$  – является несократимой дробью, при этом  $n$  – также целое число;

В электромашине с пассивным ротором число зубцов ротора – это аналог числа пар полюсов формулы (1), обозначим его « $Z_p$ ». Каждую фазу управления (съема) формируют два зубца статора, обозначим « $Z_{CT}$ » – число зубцов статора. Таким образом, единицей  $m$ -фазной системы является не число  $z$  (число зубцов в электромашине с возбуждением на роторе), а число  $\frac{Z_{CT}}{2}$ , что в два раза меньше числа  $z$ . Следовательно, соотношение (1) для рассматриваемых индукционных машин можно переписать в следующем виде:

$$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{2mk} \cdot (n \pm im) \quad (2)$$

На рисунке 1 приведена трехфазная электрическая информационная машина – редуктосин с электрической редукцией 4, который построен по

соотношению:  $4 = + \frac{6}{2 \cdot 3 \cdot 1} \cdot (1 + 1 \cdot 3)$ . Электрический угол между фазными группами равен  $\frac{360^\circ}{3} \cdot 4 = 480^\circ$  или  $120^\circ$  электрических градусов, что позволяет образовывать симметричную 3-х фазную систему.

Отметим, что, формула (2) определяет соотношения между двухфазными группами, но для правильного функционирования электромашин необходимо обеспечить расположение одного зубца статора напротив паза ротора, а другого напротив зубца ротора, что обеспечивает сдвиг фаз на зубцах внутри двух-зубцовых групп, равный  $180^\circ$ , и минимизирует высшие гармоники, что выполнено на рисунке 1.

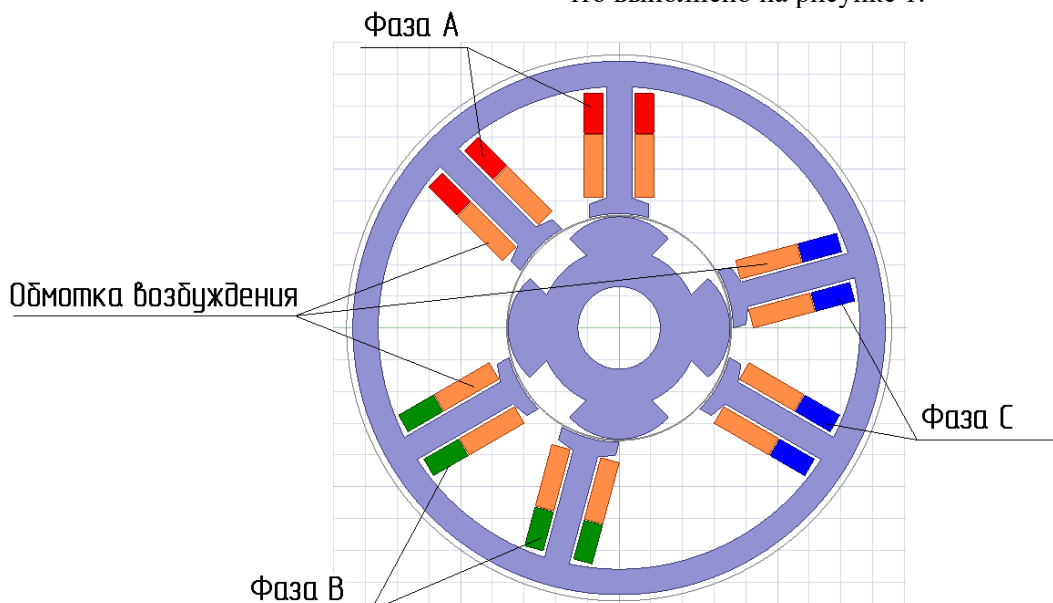


Рис. 1. Модель трехфазной индукционной электромашин с неравномерным шагом

Данная особенность электромашин приводит либо к неравномерному шагу по статору, как на рисунке 1, либо может быть реализована конструкция, представленная в виде развертки в [4] с двумя слоями зубцов (малые и большие) и является определенным недостатком данного варианта, так как приводит к усложнению обмотки, а с другой стороны к снижению числа витков.

Можно заметить одну особенность при рассмотрении электромашин с четным числом фаз. Там, где число фаз равно 4, 6, 8 и т.д., всегда существуют две фазы, сдвинутые на  $180^\circ$  электрических градусов, внутри каждой из которых, как указано выше, находится двухзубцовая группа, содержащая, также сдвиг на  $180^\circ$  электрических градусов. Это можно использовать для создания индукционных машин другой конструкции, где в одну фазу соединяются не смежные две катушки, находящиеся напротив зубца и паза ротора, а две катушки диаметрально противоположных фаз.

Преимуществом такого подхода является то, что не требуется создавать переменный шаг по статору, что упрощает обмотку и делает ее единообразной для всей электрической машины. При этом не требуется использование числа 2 в знаменателе формулы (2), а число  $m$  в этом случае можно трактовать как число полу-фаз элек-

трической машины, которые объединяясь попарно с противоположными, образуют полноценную  $(m/2)$  фазную систему. При этом как уже указано необходимо, чтобы число  $m$ , было четным.

Таким образом, соотношение (2) можно переписать в виде (3):

$$Z_p = \pm \frac{Z_{ст}}{2mk} \cdot (n \pm im) \text{ при любом } m \quad (3)$$

$$Z_p = \pm \frac{Z_{ст}}{mk} \cdot (n \pm im) \text{ при четном } m,$$

При этом по формуле в верхней части соотношения (3) формируется симметричная  $m$ -фазная электромашин, по формуле нижней части формируется симметричная  $\frac{m}{2}$ -фазная электромашин.

Приведем пример построения датчика по обоим формулам соотношения (3) на примере датчика с редукцией 5, соотношения датчиков и сравнение вариантов приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены ЭДС фаз обоих датчиков, при этом датчики имеют одинаковые размеры, схемы возбуждения, частоту запитки сигналов и одинаковый диаметр провода намотки, но разное число витков, так как при равномерном шаге повышается коэффициент заполнения паза.

Таблица 1

Сопоставление реализации датчика с редукцией 5 по ротору в 3-х фазном и 6-ти фазном варианте

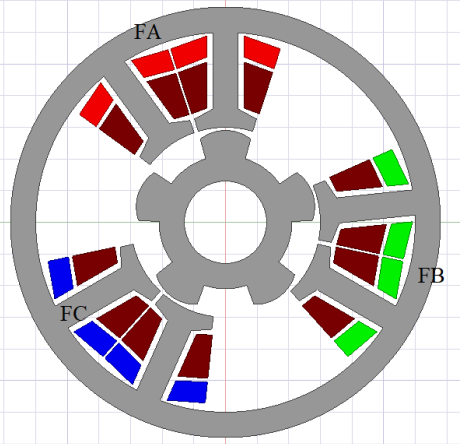
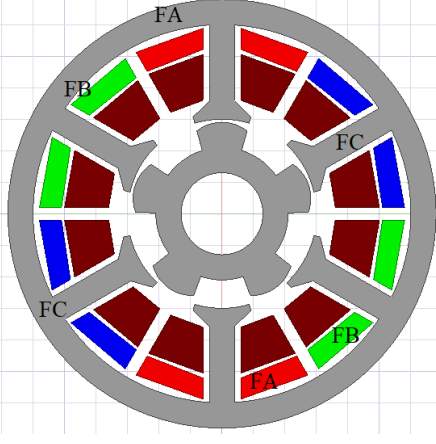
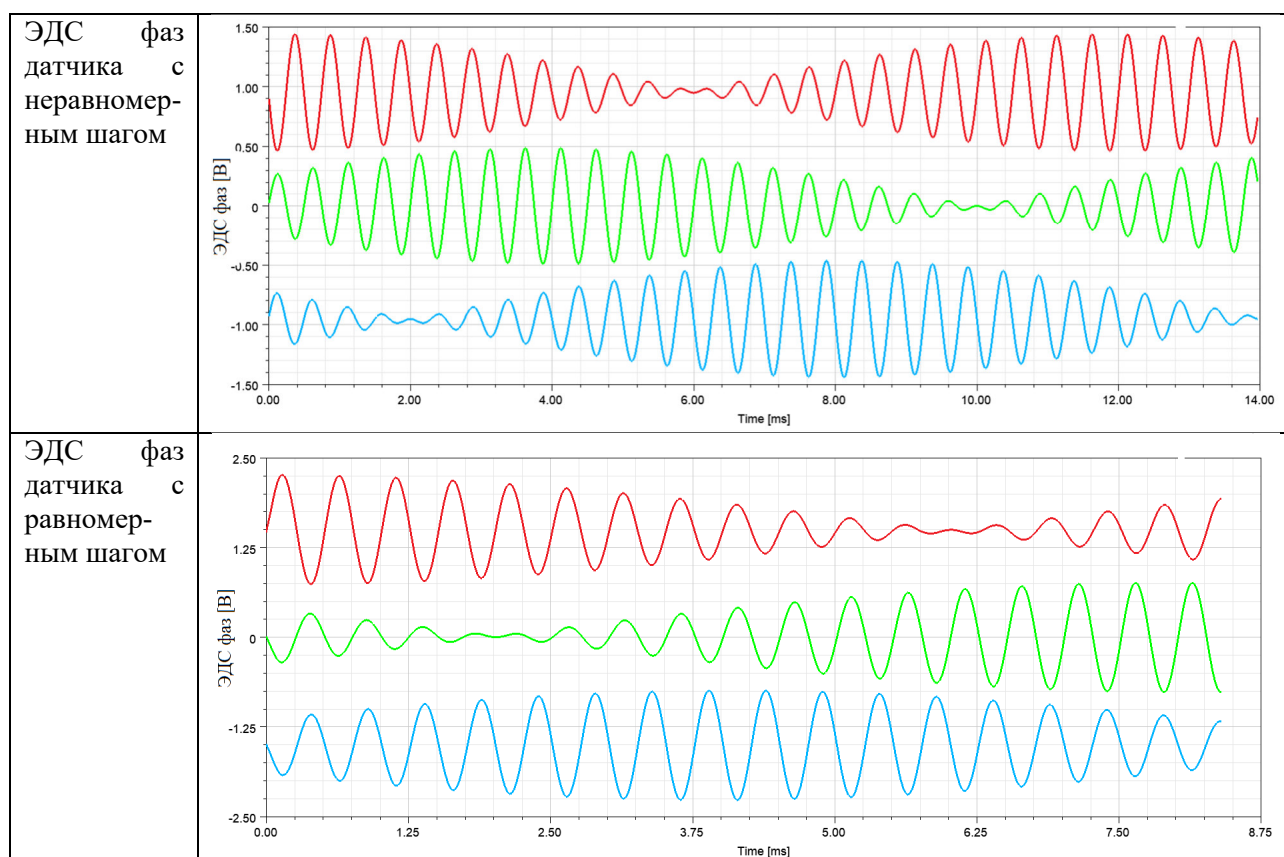
Соотношение	$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{2mk} \cdot (n \pm im); 5 = \frac{6}{2 \cdot 3 \cdot 1} \cdot (2 + 1 \cdot 3)$	$Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{mk} \cdot (n \pm im); 5 = \frac{6}{6 \cdot 1} \cdot (1 - 1 \cdot 6)$
Параметры	$Z_p = 5; Z_{CT} = 6; m = 3; n = 2; i = 1; k = 1;$	$Z_p = 5; Z_{CT} = 6; m = 6; n = 1; i = 1; k = 1;$
Общий вид датчика		

Таблица 2

ЭДС съема фаз 3-х фазного и 6-ти фазного датчика при возбуждении синусоидальным током



Кроме лучшего коэффициента заполнения датчик с равномерным шагом зубцов имеет более простую укладку обмоток, более технологичен, имеет большую крутизну сигналов, и соотношение сигнал/шум, что видно при сравнении сигналов в таблице 2.

Как пример построения датчика по формуле (3) с четным числом фаз можно привести датчик, описание которого дано в [4] на с. 145. На рисунке 2 приведен общий вид данного датчика, представленного в [4] на рисунке 6.1.

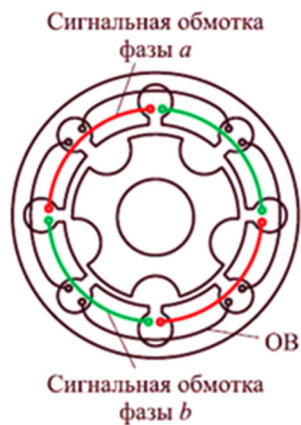


Рис. 2. Пример датчика с четным числом фаз и равномерным шагом

Датчик построен по соотношению  $Z_p = \pm \frac{Z_{CT}}{mk} \cdot (n \pm im)$  (четное  $m=4$ ), при следующих параметрах:  $Z_p=5$ ;  $Z_{CT}=8$ ;  $m=4$ ;  $n=1$ ;  $i=1$ ;  $k=2$ , что образует следующее равенство  $5 = \frac{8}{4 \cdot 2} \cdot (1 + 1 \cdot 4)$ .

Особенностью данного датчика является то, что используется 2 зубца в фазной группе. Из рисунка 2 хорошо видно, что, например, для каждого зубца фазы «а» противоположный, т.е. 5-й по счету зубец является как раз полу-фазой, перевернутой на  $180^\circ$ , что позволяет из четырех полу-фаз формировать правильную 2-х фазную систему, при этом за счет равномерности шага обеспечивается хороший коэффициент заполнения обмоткой и упрощается намотка датчика.

Соотношения (3) создают для разработчика основу для дальнейшего проектирования, задачей которого является выбор из данных соотношений тех, которые будут наиболее подходящими для проектируемой системы, и может быть применена как к исполнительным индукторным электродвигателям, так и к редукторам и тахометрам с пассивным ротором.

В качестве еще одного примера использования выражения (3) при нечетном числе фаз приведем индукционный датчик, описанный в [4] в разделе 6.2, который был разработан, практически изготовлен и исследован. Данный датчик построен по следующему соотношению:  $Z_{CT} = 56$ ;  $Z_p = 64$ ;  $m=7$  с переменным шагом по статору, который соответствует выражению:

$$64 = \frac{56}{2 \cdot 7} \cdot (2 + 2 \cdot 7) \quad (4), \text{ в котором } i=2, n=2,$$

$k=1$ . В данном случае введение  $i=2$ , позволяет значительно поднять электрическую редукцию,

что положительно сказывается на точности датчика.

Отметим, что в значительном числе случаев, разработчику требуется спроектировать измерительную электромашину (датчик или тахометр) с нужной электрической редукцией, но при этом, имеющую стандартный двухфазный синусо-косинусный выход. Это может быть связано с ограниченностью каналов обработки, например, входов АЦП микроконтроллера, или с ограниченной возможностью прокладки витых пар под каждую фазу датчика, или малым количеством контактов разъема и т.д. В этом случае преимуществом разработчика, проектирующего новую встраиваемую электромашину под заданные габариты мехатронного модуля является то, что для новой системы можно спроектировать  $m$ -фазную измерительную электромашину (например, 5,6,7-фазную), выполнить ее детальный анализ методами конечных элементов, и привести данную машину к 2-ух фазной с помощью подбора витков в  $m$ -фазной системе.

Таким образом, число витков на каждом зубце двухфазной системы определяется проекцией этого зубца как фазы  $m$ -фазной системы на оси двухфазной системы, расположенные под  $90$  градусов. Преимуществом этого варианта является компактность выводов, совместимость со стандартными синусо-косинусными алгоритмами обработки. Недостатком является усложнение обмотки, так как вместо расположения  $m$  одинаковых катушек фаз на зубцах, требуется на каждом зубце расположить 2 типа катушек съема, в каждом из которых число витков определено как проекция данной фазы из  $m$ -фазного набора на оси двухфазной системы.

**Выводы.** Предложены соотношения, для построения исполнительных и измерительных компонентов мехатронных приводных модулей, реализованных на индукторных электрических машинах с сосредоточенными обмотками и пассивным зубчатым ротором.

Выведенные соотношения позволяют проектировать индукторные двигатели, тахометры, редукторы, что позволяет разрабатывать данные компоненты под габариты, заданные конструкцией мехатронного модуля.

Рассмотрено влияние четности/нечетности фаз электромашин на конструкцию машины, что может быть использовано при построении встраиваемых в конструкцию электромашин. Отмечено преимущество использования электромашин с четным числом фаз, что позволяет использовать равномерный шаг по статору, более простую укладку обмотки, при этом электромашин имеет большую крутизну сигнала, что особенно

актуально при малых габаритах, используемых под измерительную систему.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. 2-изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. 368 с., ил.

2. Каасик П.Ю. Тихоходные безредукторные микроэлектродвигатели. Л.: Энергия 1974 г. 136 с.

3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. 350с.

4. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 240 с.

5. Тазов С.Г. Моделирование индукционных редуктосинов: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 Санкт-Петербург., 2003. 157 с.

6. Ахметжанов А.А. Высокоточные системы передачи угла автоматических устройств. Учеб. Пособие для вузов. М., «Энергия», 1975. 288 с.

7. Ахметжанов А.А., Кочемасов А.В. Следящие системы и регуляторы. М., Энергоатомиздат, 1986. 288 с.

8. Шатова Ю.А. Редукционные электромагнитные фазовращатели и информационно-измерительные системы на их основе: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.16 Пенза., 2009. 211 с.

9. Опалев Ю.Г. Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 Чебоксары., 2011. 198 с.

10. Пат. 1557641, СССР, МПК Н 02 К 24/00. Индукционный редуктосин / В.А. Батыгин, В. М. Гладких; заявитель предприятие п/я В-8708. № 4455799; заявл. 06.07.1988; опубл. 15.04.1990, Бюл. №14. 3с.

11. Пат. 1584042, СССР, МПК Н 02 К 24/00. Индукционный редуктосин / О.П. Белавин, А.В. Булеков, Н.Н. Левин, В.Д. Смирнов, А.Д. Серебряков; заявитель Рижский институт инженеров гражданской авиации им. Ленинского комсомола. № 4377341; заявл. 10.02.1988; опубл. 07.08.1990, Бюл. №29. 4 с.

12. Пат. 193505, Россия, МПК Н 02 К 24/00. Бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор (резольвер) / А.А. Афанасьев, В. А. Ваткин, А.Н. Матюхин, Патентообладатель Акционерное общество "Чебоксарский электроаппаратный завод". №2019127148; заявл. 27.08.2019; опубл. 31.10.2019, Бюл. №31. 5с.

13. Пат. 194081, Россия, МПК Н 02 К 24/00. Двухотсчетный индукционный редуктосин / О.А. Бунин, Н.Ю. Евтухов; патентообладатель акционерное общество «Завод «Фиолент». № 2019130537; заявл. 25.09.2019; опубл. 28.11.2019, Бюл. №34. 11 с.

14. Пат. 1798865, СССР, МПК Н 02 К 24/00. Индукционный редуктосин / А.Р. Гуль, О.К. Епифанов, В.Н. Зверева, В.В.Иванов; заявитель Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». № 4856160; заявл. 01.08.1990; опубл. 28.02.1993, Бюл. №8. 2 с.

15. Корчагин О.А. Связь параметров статора и ротора в электрических машинах мехатронных систем с сосредоточенными обмотками статора и возбуждением на роторе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 104–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-104-111

*Информация об авторах*

**Корчагин Олег Александрович**, зам. главного конструктора E-mail: koroleg@inbox.ru. ООО НПФ «Политех». 123001, Россия, г. Москва, Малый Патриарший переулок, д3-39

*Поступила 18.02.2024 г.*

© Корчагин О.А., 2024

**Korchagin O.A.**  
NPF Polytech LLC  
E-mail: koroleg@inbox.ru

### CONSTRUCTIVE RELATIONS IN ELECTRIC MACHINES OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH CONCENTRATED STATOR WINDINGS AND A TOOTH NON-WINDING ROTOR

**Abstract.** The issues of substantiation and selection of basic design relationships of induction machines with single-tooth windings, which can be part of newly developed mechatronic systems, are considered.

The relationships substantiated in this work can be applied in the development of new mechatronic systems, especially when the task of developing mechatronic modules for specified dimensions is often encountered in practice, which requires the development of both motors, new angle and speed sensors. In addition, this task becomes more urgent when setting harsh operating conditions, such as low and high temperatures, shocks, vibrations, and operation in submersible servos filled with oil. All this makes it difficult or impossible to use a number of other non-electromechanical sensors, such as optical, discrete Hall sensors, which further narrows the range of purchased products for embedding in the specified dimensions of the module. The considered ratios allows to implement sensors not only for different product dimensions, but also to take into account the purpose, accuracy requirements, and design meters with different electrical reduction, with different number of phases. An additional advantage of developing sensors according to these ratios is manufacturability, simplicity and speed of development and the ability to quickly launch into production.

In addition, the derived ratios make it possible to design an angle sensors, speed sensors, as well as electric motors and generators, which may be in demand in a number of special cases, for example, if it is necessary to minimize the moment of inertia of the motor rotor and to build high-speed machines.

**Keywords:** electric machines with concentrated windings, inductor electric machines, the ratio between the teeth of the stator and rotor of inductor electric machines, resolver, electric machines with a passive rotor.

## REFERENCES

1. Khrushchev V.V. Electric machines of automation systems: Textbook for universities [Elektricheskie mashiny` sistem avtomatiki: Uchebnik dlya vuzov]. 2nd ed., revised. and additional information: Energoatomizdat. Leningr. publishing House, 1985. 368 p. (rus)
2. Kaasik P.Yu. Low-speed gearless microelectromotors [Tixodny`e bezreduktorny`e mikro`elektrodvigateli]. Leningrad: Energiya 1974. 136 p. (rus)
3. Voldek A.I., Popov V.V. Electric machines. AC machines: A textbook for universities [Elektricheskie mashiny`. Mashiny` peremennogo toka: Uchebnik dlya vuzov]. St. Petersburg: St. Petersburg, 2010. 350 p. (rus)
4. Baranov M.V., Brodovsky V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N. Electric tracking drives with torque control of executive motors: Monograph [Elektricheskie sledyashhie privody` s momentny`m upravleniem ispolnitel`ny`mi dvigatelyami: Monografiya]. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2006. 240 p. (rus)
5. Tazov S.G. Modeling of resolver [Modelirovanie indukcionny`x reduktosinov]. Candidate's thesis. St. Petersburg, 2003, 157 p. (rus)
6. Akhmetzhanov A.A. High-precision angle transmission systems of automatic devices. Studies. Handbook for universities [Vy`sokotochny`e sistemy` peredachi ugla avtomaticheskix ustrojstv. Ucheb. Posobie dlya vuzov]. M.: Energy. 1975. (rus)
7. Akhmetzhanov A.A., Kochemasov A.V. Tracking systems and regulators: Textbook. Handbook for universities [Sledyashhie sistemy` i regulatory`: Ucheb. Posobie dlya vuzov]. M.: Energoatomizdat, 1986. (rus)
8. Shatova Yu.A. Reduction electromagnetic phase shifters and information and measurement systems based on them [Redukcionny`e e`lektromagnitny`e fazovrashhateli i informacionno-izmeritel`ny`e sistemy` na ix osnove]. Candidate's thesis. Penza, 2009. 211 p. (rus)
9. Opalev Yu.G. Valve electric motors for precision high-speed drives of mechatronic technological modules [Ventil`ny`e e`lektrodvigateli dlya precizionny`x by`strodejstvuyushhix privodov mexatronny`x texnologicheskix modulej]. Candidate's thesis. Cheboksary, 2011. 198 p. (rus)
10. Batygin V.A., Gladkikh V. M. Resolver [Induction reductosin]. Patent USSR no. 1557641, 1990. (rus)
11. Belavin O.P., Bulekov A.V. Resolver [Induction reductosin]. Patent USSR no. 1584042, 1990. (rus)
12. Afanasyev A.A., Vatkin V.A., Matyukhin. A.N. Contactless sine-cosine rotating transformer (resolver) [Beskontaktny`j sinusno-kosinusny`j vrashhayushhijsya transformator (rezol`ver)]. Patent RF no. 193505, 2019. (rus)
13. Bunin O.A., Evtukhov N.Yu. Two-account resolver [Dvuxotschetny`j indukcionny`j reduktosin]. Patent RF no. 194081, 2019. (rus)
14. Gul A.R., Epifanov O.K., Zvereva V.N., Ivanov V.V. Resolver [Induction reductosin]. Patent USSR no. 1798865, 1993. (rus)
15. Korchagin O.A. Relationship of stator and rotor parameters in electric machines of mechatronic systems with concentrated stator windings and excitation on the rotor. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 1. Pp. 104–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-104-111 (rus)



*Information about the authors*

**Korchagin, Oleg A.** Chief Designer. E-mail: koroleg@inbox.ru. NPF Polytech LLC, Moscow, 123001, Russia, Moscow, Maly Patriarchal alleyway, d3-39

---

*Received 18.02.2024*

**Для цитирования:**

Корчагин О.А. Конструктивные соотношения в электрических машинах мехатронных систем с сосредоточенными обмотками статора и зубчатым безобмоточным ротором // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 91–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-91-99

**For citation:**

Korchagin O.A. Constructive relations in electric machines of mechatronic systems with concentrated stator windings and a toothe non-winding rotor. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 91–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-91-99