

УДК 631.313; 621.85

UDC 631.313; 621.85

**ДВУХСКОРОСТНОЙ СИНХРОННО-АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ****2-SPEED SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR**Стрижков Игорь Григорьевич  
д.т.н., профессорStrizhkov Igor Grigorievich  
Dr.Sci.Tech., professorСтрижков Сергей Игоревич  
инженерStrizhkov Sergey Igorevich  
engineer*Кубанский государственный аграрный университет,  
Краснодар, Россия**Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье обоснована принципиальная возможность создания двухскоростного синхронно-асинхронного электродвигателя средней мощности и представлены научные основы его проектирования

In the article we present a possibility of creation of the 2-speed synchronous and asynchronous electric motor and scientific bases for its design

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ДВУХСКОРОСТНОЙ ДВИГАТЕЛЬ, СОВМЕЩЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Keywords: ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR, SYNCHRONOUS MOTOR, 2-SPEED MOTOR, COMBINED ELECTRIC MACHINES, ELECTRIC EQUIPMENT

В современных сельскохозяйственных машинах все более широкое применение находит регулируемый электропривод переменного тока. Одним из наиболее востребованных является ступенчатое регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки электродвигателя. При этом в качестве электромеханического преобразователя используется многоскоростной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором [1]. Наиболее часто используются двигатели с двумя ступенями скорости (двухскоростные) с соотношением чисел полюсов 2:1. В отдельных электроустановках применяют асинхронные двигатели с тремя или четырьмя ступенями скорости. Как двух-, так и многоскоростные двигатели используются в станках различного назначения, подъемных и транспортных машинах, в приводе насосов, вентиляторов и др. Полюсопереключаемые двигатели имеют хорошие перспективы применения в приводе электротракторов и других мобильных машин полеводства. Их главными достоинствами являются сохранение номинальной мощности электродвигателя на

нижних ступенях скорости и относительная простота устройства управления (переключения обмоток).

Серийные двухскоростные двигатели с соотношением полюсов 2:1 изготавливаются с одной трехфазной статорной обмоткой, выполненной по схеме Деландера. Для обмоток с другим соотношением числа полюсов используют обмотки, построенные по методу амплитудно-фазовой модуляции [2].

У современных синхронных двигателей полюсопереключаемые обмотки не применяются. Причина в том, что на каждой ступени скорости трехфазная обмотка статора (якоря) и обмотка возбуждения (индуктора) должны иметь одинаковое число полюсов и проблемой является изменение числа полюсов вращающегося индуктора. Такое изменение реализуется сложными устройствами, что делает полюсопереключаемый синхронный двигатель неконкурентоспособным в сравнении с асинхронным короткозамкнутым.

Вместе с тем, известные преимущества синхронных двигателей, такие как более высокие энергетические показатели и высокая устойчивость при снижении напряжения питающей сети, делают актуальным поиск эффективных способов их применения в двухскоростном приводе. Одним из решений является применение полюсопереключаемых двигателей с синхронным режимом работы на одной ступени скорости и асинхронным - на другой. В приводе турбомеханизмов и иных механизмов с вентиляторной механической характеристикой может быть целесообразным синхронный режим двигателя на высшей ступени скорости, когда от него требуются высокие перегрузочная способность и энергетические показатели при высокой нагрузке двигателя, и асинхронный - на низшей ступени скорости, поскольку у таких механизмов нагрузка резко снижается с уменьшением частоты вращения и высокие энергетические показатели и устойчивость менее актуальны. Для тягового двигателя электротрактора может быть це-

лесообразным синхронный режим работы на низшей ступени скорости - для выполнения таких энергоемких "тихоходных" операций, как пахота, фрезерование почвы и т.п. [3], и асинхронный - при выполнении более "скоростных", но менее энергоемких операций - внесение минеральных удобрений, опрыскивание и т.п.

Могут быть целесообразны иные варианты использования полюсопереключаемого двигателя. Например, для регулируемых вентиляторов или насосов, работающих продолжительное время на низшей ступени скорости и, следовательно, со значительной недогрузкой по механической мощности, целесообразно на нижней ступени скорости использовать синхронный режим электродвигателя с сильным перевозбуждением для "генерирования" реактивной мощности. В этом случае электродвигатель по использованию близок к синхронному компенсатору. В непродолжительные периоды работы на высшей ступени скорости целесообразен асинхронный режим работы двигателя, поскольку малое время использования снижает актуальность высоких энергетических показателей.

Известны способы изменения числа полюсов обмотки за счет переключений токоподводящих проводников без использования переключений внутри обмотки [4]. Такое изменение, как правило, сопровождается изменением числа фаз обмотки. Речь идет о принципе электрического совмещения обмоток, который позволяет использовать роторную обмотку как в качестве обмотки возбуждения (аналогичной однофазной) с  $p = p_1$  при питании от источника постоянного, выпрямленного или однофазного переменного тока, так и в качестве многофазной обмотки переменного тока с  $p = p_2$  при реализации асинхронного режима работы электрической машины. В традиционном понимании совмещенной называют обмотку, выполняющую одновременно две или несколько функций. Однако эта же обмотка может выполнять свои совмещаемые функции разновременно, т.е. в одной ситуации (временном интервале) выполнять одну из своих функций, а в

другой – другую [5, 6]. В этом случае мы считаем целесообразным сохранить термин "совмещенная" для обозначения особенностей этой обмотки. Поскольку использование совмещенных обмоток в двухскоростном синхронно-асинхронном электродвигателе имеет свои особенности, не нашедшие должного отражения в научной литературе, в работе приводится краткая информация по этим вопросам.

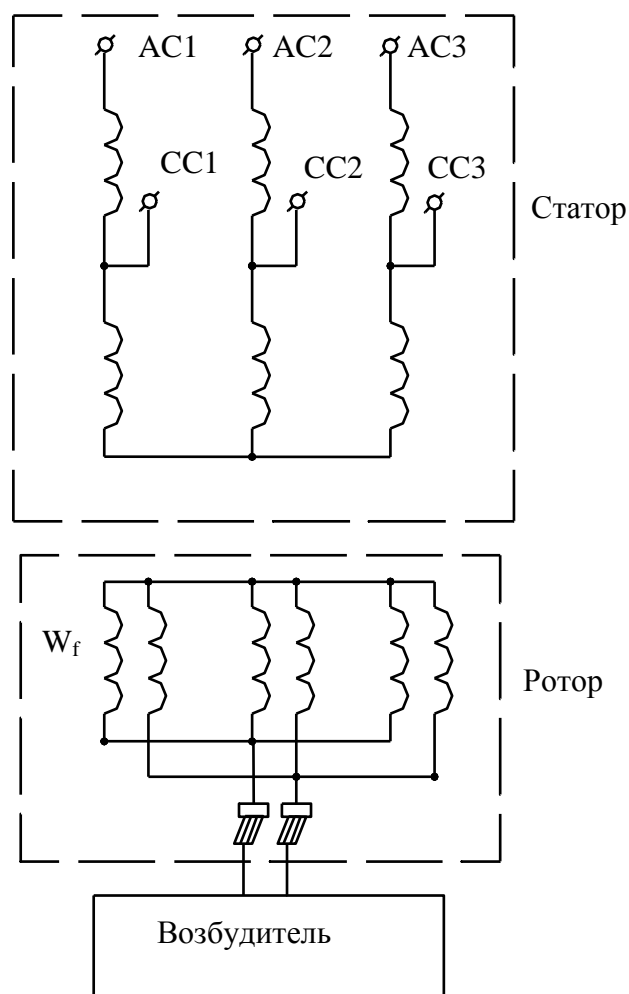
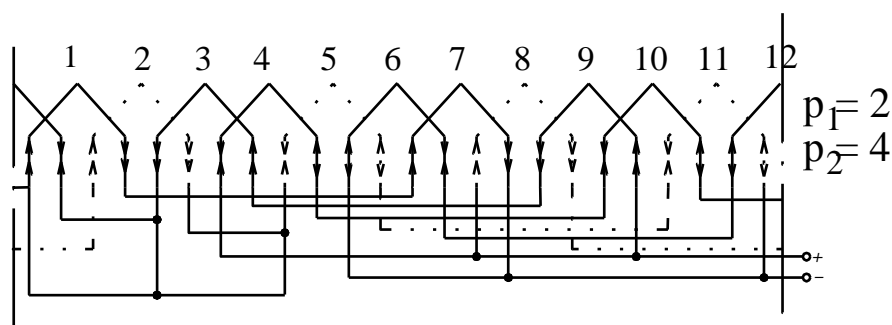


Рисунок 1 – Схема включения обмоток двухскоростного синхронно-асинхронного двигателя



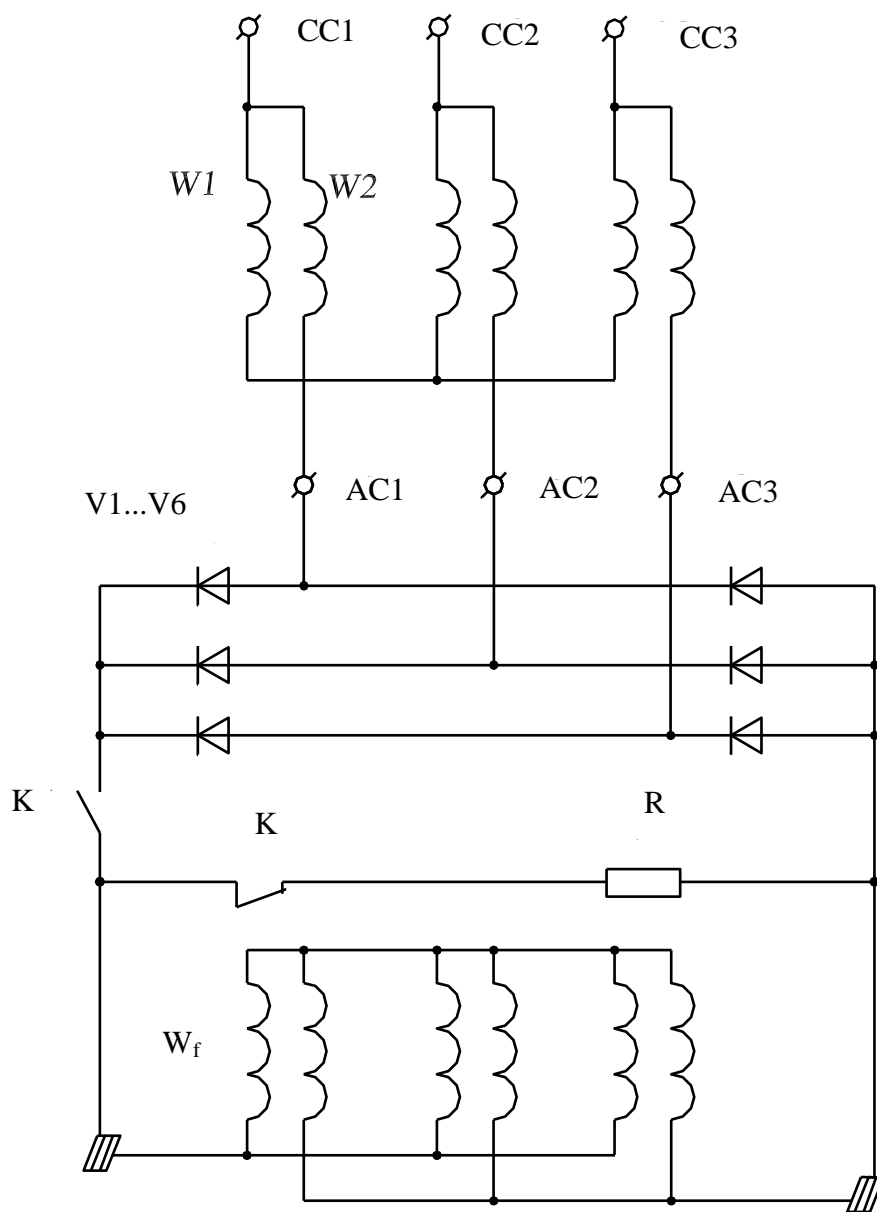


Рисунок 3 - Схема соединения обмоток двухскоростного синхронно-асинхронного двигателя с упрощенным возбудителем

Двухскоростной синхронно-асинхронный двигатель, работающий на одной ступени скорости в синхронном режиме, обеспечивающем высокие энергетические показатели и перегрузочную способность двигателю, а на другой ступени - как асинхронный с закороченной многофазной обмоткой на роторе, имеет конструктивные части и магнитопровод асинхронного двигателя с фазным ротором. Общие принципы построения обмоток двухскоростного синхронно-асинхронного двигателя можно показать на примере двигателя с асинхронным режимом на высшей ступени скорости и синхронным на низшей.

На статоре двигателя располагается полюсопереключаемая обмотка (рис. 1) с традиционной для двухскоростных асинхронных двигателей схемой - обмотки и соотношением пар полюсов  $p_1:p_2 = 1:2$ . Предпочтительнее использовать схему “звезда - двойная звезда”. Примеры схем полюсопереключаемых трехфазных обмоток широко известны [2] и здесь не приводятся.

При подключении трехфазного источника к клеммам BC1, BC2, BC3 и соединении накоротко клемм HC1, HC2, HC3 в машине образуется вращающееся магнитное поле с  $p = p_2$ . На роторе размещается обмотка совмещенного типа, объединяющая трехфазную обмотку с  $p = p_1$  и обмотку возбуждения (постоянного тока) с  $p = p_2$ . Эта обмотка выполняется как многофазная с двумя параллельными ветвями и разделенными нейтралями (рис. 2,а), причем нейтрали присоединены к двум контактными кольцам для подключения через щетки к возбудителю (возможен и бесконтактный вариант присоединения к возбудителю). Такая обмотка имеет распределение МДС, представленное на рис. 2,б.

При работе на высшей ступени скорости ( $p = p_1$ ) совмещенная роторная обмотка остается не подключенной к внешним цепям и проявляет себя как трехфазная закороченная; обе нейтрали эквипотенциальны. Двигатель работает как асинхронный короткозамкнутый.

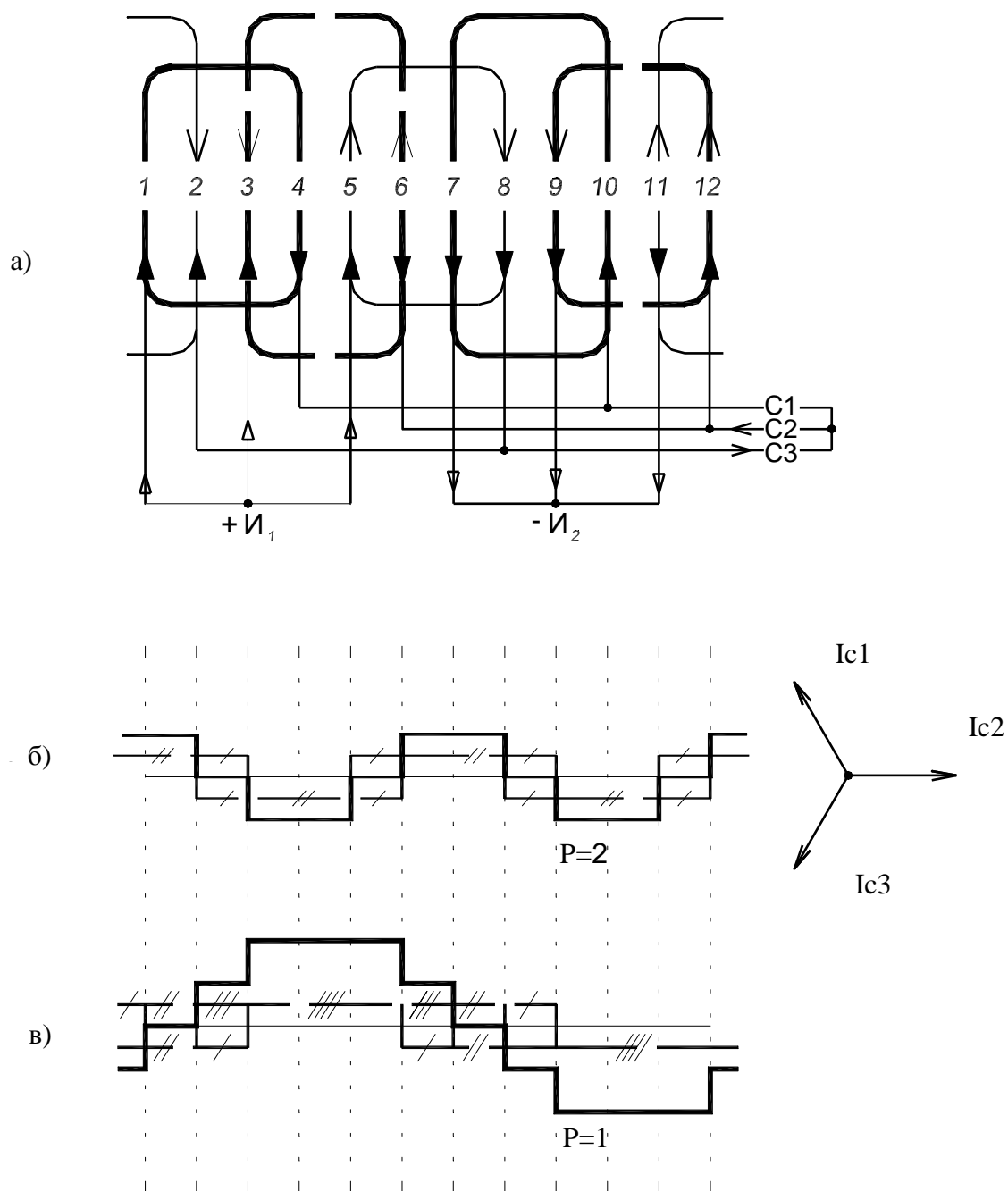


Рисунок 4 - Схема совмещенной обмотки ротора (а)  
и графики н.с. трехфазного с  $P = 2$  (б)  
и постоянного с  $P = 1$  (в) тока.

При работе на низшей ступени скорости ( $p = p_2$ ) вращающееся магнитное поле машины не наводит трехфазной ЭДС в роторной обмотке, вследствие равенства нулю коэффициента взаимоиנדукции с трехфазной обмоткой статора. Обмотка ротора через контактные кольца присоединяется к возбудителю (источнику постоянного или выпрямленного тока), в результате чего образовавшаяся волна МДС ротора заставляет его вращаться синхронно с магнитным полем, т.е. в синхронном режиме.

Задача построения электродвигателя с синхронным режимом на высшей ступени скорости может быть решена следующим образом. Статорная обмотка электродвигателя выполняется полюсопереключаемой с числом пар полюсов  $p_1:p_2$ , а обмотка ротора - совмещенной, объединяющей обмотку возбуждения с числом пар полюсов  $p = p_1$ , создающую волну магнитодвижущей силы, неподвижную относительно ротора и многофазную обмотку с  $p = p_2$  и вращающейся волной МДС; при этом на входе выпрямителя установлены дополнительные клеммы для подключения источника питания (сети) в режиме с  $p = p_2$ .

Одно из отличий схемы статорной обмотки от известных схем, применяемых в серийных двухскоростных асинхронных двигателях, заключается в различном числе витков этих параллельных ветвей  $W1$  и  $W2$ , что продиктовано необходимостью создания нескомпенсированной ЭДС на входе выпрямителя для создания тока возбуждения в синхронном режиме.

На роторе расположена совмещенная обмотка с двумя параллельными ветвями, соединенная по схеме "двойная звезда". На рис. 2 в качестве частного примера представлена развернутая схема такой обмотки (а), диаграммы намагничивающих сил для трехфазной обмотки с  $p_1 = 2$  (б) и возбуждения с  $p_2 = 1$  (в), детально обоснованная в [4].

Выпрямитель  $V1-V6$  включается последовательно с проходной статорной обмоткой и совмещенной роторной, обеспечивая питание обмотки ротора в синхронном режиме выпрямленным током, пропорциональным



току проходной обмотки статора  $W_2$  [7, 8]. Электрическая связь вращающейся обмотки ротора с неподвижной обмоткой статора осуществляется через контактные кольца. Резистор  $R$  используется как пусковой и выполняет те же функции, что и в традиционном синхронном двигателе. Коммутатор (выключатель)  $K$  подключает резистор  $R$  на период разбега в асинхронном режиме и выключает его при достижении двигателем подсинхронной скорости, а также служит для присоединения обмотки ротора к обмотке  $W_2$  в синхронном режиме и для отсоединения этих обмоток друг от друга в асинхронном. Для присоединения двигателя к источнику питания (сети) в синхронном режиме с  $p = p_1$  используются клеммы  $C$ , а в асинхронном режиме с  $p = p_2$  клеммы  $A$ .

В синхронном режиме ключ  $K$  находится во включенном положении. Обе статорные обмотки создают единое вращающееся магнитное поле с  $p = p_1$ , а обмотка ротора создает волну МДС, неподвижную относительно ротора, которая выполняет функцию МДС возбуждения. Эта МДС сцепляется с вращающейся МДС обмотки статора и машина работает как синхронная. Требуемый коэффициент мощности получают соответствующим выбором тока возбуждения, который зависит от параметров указанных обмоток ротора и статора.

В асинхронном режиме ключ  $K$  может находиться в любом положении (например, выключен). Питание подается на клеммы  $A$ , клеммы  $C$  остаются свободными. Вследствие изменения направления тока в статорной обмотке  $W_2$  изменяется число пар полюсов обмотки статора. В этом случае поле статора вращается со скоростью, соответствующей числу пар полюсов  $p_2$ .

Обмотка ротора, не имея гальванической связи со статорной, работает как обмотка асинхронного двигателя, у которого все три фазы закорочены, а узлы разомкнутых "звезд" эквипотенциальны.

Для запуска двигателя могут использоваться разные схемы пуска: для асинхронного режима он может быть прямым подобно пуску традиционного асинхронного короткозамкнутого двигателя. Для использования синхронного режима пуск может быть проведен в несколько ступеней: сначала прямой асинхронный при  $p = p_2$ , затем переключением схемы статорной обмотки уменьшается число пар полюсов до  $p_1$ ; ключ К переключается, подключая разрядное сопротивление R и двигатель разгоняется за счет тока обмотки ротора и вихревых токов в магнитопроводе ротора до подсинхронной скорости. Затем ключ К переключается и двигатель втягивается в синхронизм аналогично классическому синхронному двигателю.

Также как и базовый синхронный двигатель с двойной якорной обмоткой (СДДЯ), двухскоростной синхронно-асинхронный двигатель может иметь бесконтактное исполнение. Для этого необходимо использовать те же конструктивные схемы двигателя в синхронном режиме, что и для базовой односкоростной машины [7, 9, 10]. В асинхронном режиме глухоподключенный бесконтактный возбудитель должен быть пассивным, т.е. не имеющим ЭДС в вращающейся роторной обмотке, что достигается отключением от источника питания его неподвижной статорной обмотки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оськин С.В. Автоматизированный электропривод: учебное пособие для студентов вузов / С.В. Оськин – Краснодар: Изд-во ООО «КРОН», 2013.- 489 с.
2. Ванурин В.Н. Электрические машины.-М.: Колос, 1995.-256 с.
3. Технологический комплекс на базе ЭДМФ «Кубань» / И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк, А.Н. Трубин, С.И. Стрижков / Ж. Механизация и электрификация с.х., 2005, № 2, с. 4-6.
4. Попов В.И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты.-М.: Энергия, 1980. -176 с.
5. Патент РФ 2141713, МКИ Н 02 К 17/26, 17/14. Синхронно-асинхронный двигатель / Стрижков И.Г. и др. Оpubл. 20.11.99 Б.И. № 32.
6. Патент РФ 2141714, МКИ Н 02 К 17/26, 17/14. Двухскоростной синхронно-асинхронный двигатель / Стрижков И.Г. и др. Оpubл. 20.11.99 Б.И. № 32.
7. Стрижков И.Г. Бесконтактное возбуждение синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой// Электрификация с.-х. производства: Сб. науч. тр. КГАУ. Вып. 346(374). - Краснодар, 1995. С. 94-103.

8. Strizhkov I.G. Rectifier modelling in excitation systems of special synchronous motors (англ.) (Моделирование выпрямителей специальных синхронных моторов)/ I.G. Strizhkov, E.N. Chesnyuk, R.R. Beglyarov, S.I. Strizhkov *Kybernetik (Кибернетика)*@Verlag, Hannover: № 10, 2013. ISSN 2190-4146, 10, 2013. p.35-43.

9. Стрижков И.Г. Основы теории синхронных машин с несколькими обмотками на статоре / И.Г. Стрижков / Науч. журнал КубГАУ, 2012, - № 84(10),. Краснодар: КубГАУ, 2012. Шифр ИНФОРМРЕГИСТРА: 0421100012\0260. – Режим доступа <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/36.pdf>

10. Стрижков И.Г. Электропривод оросительного насоса на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой / И.Г. Стрижков, Р.Р. Бегляров / Труды Кубанского гос. агр. ун-та. Научный журнал. Выпуск 1(16), 2009, с. 197-199

### References

1. Os'kin S.V. Avtomatizirovannyj jelektroprivod: uchebnoe posobie dlja studentov vuzov / S.V. Os'kin – Krasnodar: Izd-vo ООО «KRON», 2013.- 489 s.

2. Vanurin V.N. Jelektricheskie mashiny.-M.: Kolos, 1995.-256 s.

3. Tehnologicheskij kompleks na baze JeDMF «Kuban'» / I.G. Strizhkov, E.N. Chesnyuk, A.N. Trubin, S.I. Strizhkov / Zh. Mehanizacija i jelektrifikacija s.h., 2005, № 2, s. 4-6.

4. Popov V.I. Jelektromashinnye sovmeshhennye preobrazovateli chasto-ty.-M.: Jenergija, 1980. -176 s.

5. Patent RF 2141713, MKI N 02 K 17/26, 17/14. Sinhronno-asinhronnyj dvigatel' / Strizhkov I.G. i dr. Opubl. 20.11.99 B.I. № 32.

6. Patent RF 2141714, MKI N 02 K 17/26, 17/14. Dvuhskorostnoj sinhronno-asinhronnyj dvigatel' / Strizhkov I.G. i dr. Opubl. 20.11.99 B.I. № 32.

7. Strizhkov I.G. Beskontaktное возбуждение синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой// Jelektrifikacija s.-h. proizvodstva: Sb. nauch. tr. KGAU. Vyp. 346(374). - Krasnodar, 1995. S. 94-103.

8. Strizhkov I.G. Rectifier modelling in excitation systems of special synchronous motors (англ.) (Modelirovanie vyprjamitelej special'nyh sinhronnyh motorov)/ I.G. Strizhkov, E.N. Chesnyuk, R.R. Beglyarov, S.I. Strizhkov *Kybernetik (Кибернетика)*@Verlag, Hannover: № 10, 2013. ISSN 2190-4146, 10, 2013. p.35-43.

9. Strizhkov I.G. Osnovy teorii sinhronnyh mashin s neskol'kimi obmotkami na statore / I.G. Strizhkov / Nauch. zhurnal KubGAU, 2012, - № 84(10),. Krasnodar: KubGAU, 2012. Shifr INFORMREGISTRA: 0421100012\0260. – Rezhim dostupa <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/36.pdf>

10. Strizhkov I.G. Jelektroprivod orositel'nogo nasosa na baze sinhronного двигателя с двойной якорной обмоткой / I.G. Strizhkov, R.R. Beglyarov / Trudy Kubanskogo gos. agr. un-ta. Nauchnyj zhurnal. Vypusk 1(16), 2009, s. 197-199