

Список литературы

1. Бычков Н.М. Ветродвиатель с эффектом Магнуса. 1. Результаты модельных исследований // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11. — № 4. — С. 583–596.
2. Бычков Н.М. Ветродвиатель с эффектом Магнуса. 2. Характеристики вращающегося цилиндра // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12. — № 1. — С. 59–175.
3. Бычков Н.М. Ветродвиатель с эффектом Магнуса. 3. Расчетные характеристики ветроколеса // Теплофизика и аэромеханика. — 2008. — Т. 15. — № 2. — С. 583–596.
4. Акылбаев Ж.С., Кусаинов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А. Особенности аэродинамики вращающегося цилиндра в потоке // Промышленная теплотехника. — Киев, 2003. — № 4. — Т. 25. — С. 279–281.
5. Акылбаев Ж.С., Кусаинов К., Сакипова С.Е. и др. Исследование подъемной силы вращающегося цилиндра при поперечном обтекании турбулентным потоком газа // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. — Алматы: КазНУ, 2003. — С. 78.
6. Kusaiynov K., Sakipova S.E. Aerodynamics of the cylinder in a cross flow // Eurasian Physical Technical Journal. — Karaganda: KarSU. — 2004. — Vol. 4. — № 1. — P. 71–75.
7. Kusaiynov K., Sakipova S.E., Nikitina L.A. Aerodynamics of the transversally streamlined rotated barrel // Methods of aerophysical research: Materials of 12th international conference. ICMAR-2004. — Novosibirsk, 2004. — Vol. 4. — P. 195–198.
8. Кусаинов К., Жуматаева Г.С., Рузанов К.А., Хасенов А.К. Турбулентный след за усеченным конусом / Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 5-й междунар. конф. — Астана, 2006. — С. 55–58.

УДК 533.601; 621.548

Б.Р.Нусупбеков¹, Н.Т.Исембергенов²¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;²Казахский национальный технический университет им. К.И.Сатпаева, АлматыСОЗДАНИЕ МАЛОБОРОТИСТОГО БЕЗРЕДУКТОРНОГО
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Қазақстан Республикасының жел шарттарын қанағаттандыратын желэлектрлік қондырғылар баяу жұмыс істейтін жел қозғалтқыштардың құрылымына тәуелді. Сондықтан төмен айналымды генераторды жасау және құру өзекті техникалық мәселе болып отыр. Генераторды жасау кезінде біз синхронды төмен айналымды бүйірлік генератордың әр түрлі нұсқаларын қарастырдық. Төмен айналымды генератордың 1-нұсқадағы құрылымының ерекшелігі — қуаттың артуына мүмкіндік беретін генераторда екі статорының болуы. Ал төмен айналымды генератордың 2-нұсқадағы құрылымының ерекшелігі — берілген генератордың бір статорлы болып жасалуында. Тұрақты магнитті генератор бүйірлік статордан тұрады және якорь орамасымен полюсті шығыңқысы бар ортада орналасқан. Қоздырғыш ретінде тұрақты магниттер қолданылған, бұл кезде магнит өрісі түзу тізбектей алмасуы керек.

Wind power installation to a large extent depend on the chosen design slow-speed wind turbine, which corresponds to the wind conditions of our Republic of Kazakhstan. Therefore, the development and creation of low-return generator is an actual technical problem. In the course of a generator, we have developed and manufactured various options for low-return of end of synchronous generators. The peculiarity of design 1-st version of the low-return generator is that the generator has two stator, thus increasing capacity. Design features 2-nd low-return version of the generator is that this version of the generator is designed with a single stator. Permanent magnet generator consists of an end-around the circumference of the stator and the tabs are located pole with coil anchor. As the excitation used permanent magnets, with the polarity of the magnetic fluxes must rotate in direct sequence.

Исследования ветроэнергетического потенциала в ряде мест по территории Казахстана, проведенные в рамках проекта Программы развития ООН по ветроэнергетике, показывают наличие хорошего ветрового климата и условий для строительства ветроэлектрической станции (ВЭС) в Южной зоне (Алматинская, Жамбылская, Южно-Казахстанская области), в Западной зоне (Мангистауская и Атырауская области), в Северной зоне (Акмолинская область) и в Центральной зоне (Карагандинская область). Наличие свободного пространства позволяет развивать мощности ВЭС до тысяч МВт. На Юге и Западе Казахстана спрос на ветроэнергетику появится уже к 2015 г., что обусловлено возрастающим дефицитом электроэнергии и ростом цен на газ, используемый на местных электростанциях,

а также импортом электроэнергии из Центральноазиатских Республик. Всемирное вовлечение возобновляемых источников энергии в производство электроэнергии позволяет добиться стабилизации выбросов парниковых газов от энергетического сектора. Однако в условиях существующего рынка электроэнергии ветроэнергетические ресурсы Казахстана практически не осваиваются. Основной причиной является неконкурентность ветроэнергетики на рынке электроэнергии. Стоимость электроэнергии от ВЭС с учетом возврата инвестиций может составлять порядка 8–12 тг/кВт·ч. Стоимость электроэнергии на шинах энергопроизводящих организаций составляет в настоящее время 2–4,5 тг/кВт·ч. Прогнозируемая стоимость электроэнергии у энергопроизводящих организаций к 2015 г. может составить: в Южном зоне — 5,5–8,5* тг/кВт·ч, Западной зоне — 5–6 тг/кВт·ч, Акмолинской области — 5,5–7,9* тг/кВт·ч, Карагандинской области — 6–7,5* тг/кВт·ч (* — стоимость электроэнергии у энергопроизводящих организаций Павлодарской области с учетом транспорта по сетям КЕГОК). Необходимо отметить, что после возврата инвестиций ветроэнергетика вполне может быть конкурентной на рынке электроэнергии¹.

Казахстан обладает также значительными ресурсами возобновляемой энергии в виде гидроэнергии, энергии солнца, ветроэнергии, биомассы. Однако, помимо части гидроэнергии, эти ресурсы не нашли широкого применения, вплоть до настоящего времени.

Из возобновляемых источников энергии наиболее эффективной является ветроэнергия, хотя ее использование связано с определенными климатическими условиями. Ветер является одним из наиболее мощных энергетических источников и может быть утилизирован в народном хозяйстве в значительно больших масштабах, чем в настоящее время. Потенциальные возможности использования энергии ветра практически не ограничены в большинстве зон. Однако эти возможности постоянно меняются в зависимости от совершенствования технических средств.

Эффективное использование ветродвигателей наиболее привлекательно, так как не нарушается природный баланс энергии на планете и одновременно используется безотходная, **экологически чистая** технология производства энергии для различных целей: заряд аккумуляторов и накопление электроэнергии, энергоснабжение различных объектов и удаленных местностей (освещение улиц, отопление зданий, домов, ферм, электрификация полевых станков и зернохранилищ, пастбищ, пасек и др.). Ветродвигатель имеет широкий диапазон эксплуатационных скоростей ветра и может работать в неоднородном воздушном потоке у поверхностей Земли, используя энергию приземного ветра.

Таким образом, ветроэнергетика рассматривается не только как экологически «чистый» источник энергии, она также поддерживает социально-экономическое развитие, энергетическую безопасность и снижает зависимость электроэнергии от цен на топливо. В связи с вышеизложенным разработка и внедрение ветроэнергетических станций для производства электроэнергии на сегодняшний день являются актуальной задачей промышленности.

На сегодняшний день в зависимости от числа лопастей ветродвигатели разделяются на быстроходные и тихоходные. Их быстроходность определяется отношением окружной скорости конца лопасти ветродвигателя к скорости ветра $Z = \frac{\omega R}{V}$, где $\omega = \frac{\pi n}{30}$ — угловая скорость конца лопасти при числе оборотов « n » ветродвигателя, об./мин; R — радиус ветродвигателя, м; V — скорость ветра, м/сек.

Характеристики и параметры ветродвигателя удобно сопоставлять при помощи аэродинамических характеристик, которые показывают, как изменяются коэффициент использования энергии ветра и крутящий момент в зависимости от быстроходности [1]. Аэродинамические характеристики трех- и многолопастных ветродвигателей, представленные в работе [2], позволили определить их основные параметры, которые приведены в таблице.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы: многолопастные ветродвигатели отличаются большим моментом сдвига и вращения и малой быстроходностью, а малолопастной — относительно малым моментом сдвига и большой быстроходностью.

Однако следует отметить, что их мощность практически не зависит от числа лопастей и будет одинаковой, если равны диаметры ветродвигателя и коэффициенты использования энергии ветра, который определяется как доля первоначальной энергии воздушного потока, преобразованная ВД в механическую. Мощность ветродвигателя в зависимости от его диаметра, скорости ветра и коэффициента использования энергии ветра определяется выражением

¹ Национальная программа развития ветроэнергетики до 2015 года с перспективой до 2024 года; План развития электроэнергетической отрасли РК. Министерство энергетики и минеральных ресурсов РК. 2007 год.

$$P = \frac{D^2 V^3 \xi}{2080} [kW], \quad (1)$$

откуда следует, что мощность ветродвигателя изменяется пропорционально квадрату диаметра и кубу скорости ветра, где ξ — коэффициент использования энергии ветра.

Т а б л и ц а

Основные параметры многолопастных ветродвигателей

Наименование показателя/число лопастей	3 лопасти	12 лопастей	18 лопастей
Коэффициент использования энергии ветра	0,42	0,34	0,36
Относительный момент сдвига и вращения	0,03	0,28	0,48
Нормальная быстроходность	4,0	2,5	1,5
Синхронная быстроходность	8,0	6,0	2,6
Скорость ветра начала вращения ВД, м/с	5,0–7,0	2,5–3,0	3,0–4,0

Из приведенных данных таблицы следует, что технические параметры рассматриваемых ветродвигателей по некоторым показателям отличаются существенно. Следовательно, их эксплуатационные показатели будут весьма различными в процессе их работы при одних и тех же ветровых режимах. Поэтому для правильной и эффективной их эксплуатации важно знать не только конструктивные параметры ветродвигателя, но и сколько часов в год может работать ветроэлектрическая установка (ВЭУ) с данным ветродвигателем, а также среднегодовую полезную мощность, ветроэнергетические параметры и коэффициент использования установленной мощности ВЭУ [3–5].

Отличительной особенностью разработанной электрической системы ветроэлектрической установки является наличие принципиально нового генератора, что повышает надёжность электрической системы и снижает ее стоимость.

Важно, что эффективность эксплуатации разработанной ветроэлектрической установки в значительной мере зависит от выбранной конструкции тихоходного ветродвигателя, которая соответствует ветровым условиям Республики Казахстан, и ветроэлектрическая установка может обеспечить потребителя электроэнергией в течение 60 % годового времени. Быстроходные ветродвигатели обладают малым пусковым моментом и большей стартовой скоростью ветра — 5–7 м/с, следовательно, эксплуатация ветроэлектрических установок с быстроходными ветродвигателями при действующих скоростях ветра на территории республики практически неприемлема для надёжного и эффективного использования энергетических ресурсов ветра.

Таким образом, как показали результаты исследований, правильный выбор конструктивного исполнения ветродвигателя и генератора во многом определяется полнотой учёта ветровых режимов и хозяйственных условий эксплуатации на территории, мощности и режимов работы токоприёмников, а также требований, предъявляемых к энергоснабжению потребителя. Несомненно, что оптимальная конструкция вращающегося цилиндра заданного сечения, кинематической передачи и электрической системы установки обеспечит более эффективную работу установки и позволит успешно решать вопросы использования энергии ветра.

В связи с этим нами разработаны различные модели синхронных генераторов для выработки электрической энергии, а также в ходе экспериментальных работ выбраны оптимальные варианты низкооборотных генераторов.

По нашим данным, для работы ветродвигателя ВДВЦ наиболее пригодны разработанные нами тихоходные торцевые генераторы коммутаторного типа (НТГК-1), которые позволяют осуществлять их привод от ветроколеса, надетого непосредственно на вал генератора [6–7].

Как известно, для быстроходных генераторов требуется специальная передача от ветроколеса (которую на местах часто затруднительно изготовить). В связи с этим ветроэнергетическая установка вырабатывает энергии в 5 раз меньше по сравнению с ветроколесом, насаженным непосредственно на вал генератора.

Следует учесть, что 24-вольтовый генератор мощностью около 2 кВт, работающий при стартерном запуске как электродвигатель от аккумуляторов с напряжением около 24 В, будет на холостом ходу потреблять не менее 10 и не более 15 А. Число оборотов этого генератора на 40 % меньше, чем генератора, который вращается непосредственно от ветроколеса и даст ток такой же силы, заряжая 24-вольтовые источники питания.

В ходе проведения работ по созданию генератора нами были разработаны и изготовлены различные варианты синхронных низкооборотных торцевых генераторов. Особенностью конструкции 1-го варианта низкооборотного генератора является то, что в нем имеется два статора, благодаря чему возрастает мощность. По принципу работы генератор ничем не отличается от известных синхронных генераторов, однако конструктивные изменения позволяют выполнить его низкооборотным.

Особенностью конструкции низкооборотного генератора является то, что в генераторе дополнительно имеется второй торцевой статор с полюсными выступами, на которых расположены обмотки возбуждения, благодаря чему возрастает мощность, и система возбуждения становится бесконтактной.

На рисунке 1 представлена упрощенная конструкция низкооборотного торцевого генератора коммутаторного типа с обмоткой возбуждения. Низкооборотный торцевой генератор с обмоткой возбуждения состоит из двух торцевых статоров 1 и 2, а по окружности расположены полюсные выступы с обмоткой якоря 3, а также расположены обмотки возбуждения. Иногда обмотки возбуждения могут быть заманены постоянными магнитами 4. В качестве возбуждения могут быть использованы обмотки возбуждения (рис. 2 и 3), при этом полярность магнитных потоков должна чередоваться. Между шихтованными сердечниками статора 1 и 2 расположены по окружности сердечники ротора 5, которые изолированы друг от друга немагнитным материалом 6. На валу ротора 7 посажены подшипники 9, которые с помощью передней и задней крышек 8 крепятся к корпусу 10.

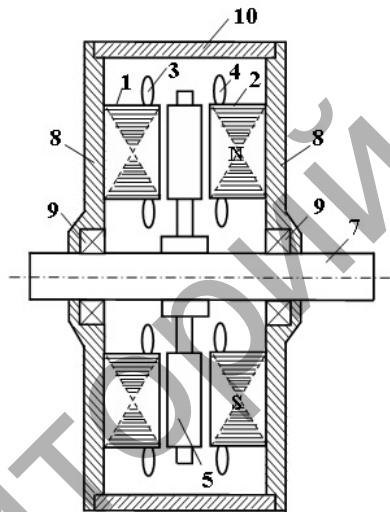


Рис. 1. Низкооборотный торцевой генератор коммутаторного типа (НТГК-1)

На рисунке 5 представлена развернутая схема низкооборотного торцевого генератора коммутаторного типа, где второй торцевой статор с полюсными выступами, на которых намотаны обмотки возбуждения, сдвинуты относительно таких же выступов первого статора на половину полюсного деления, а сердечники ротора находятся между торцевыми статорами и изолированы друг от друга немагнитным материалом.

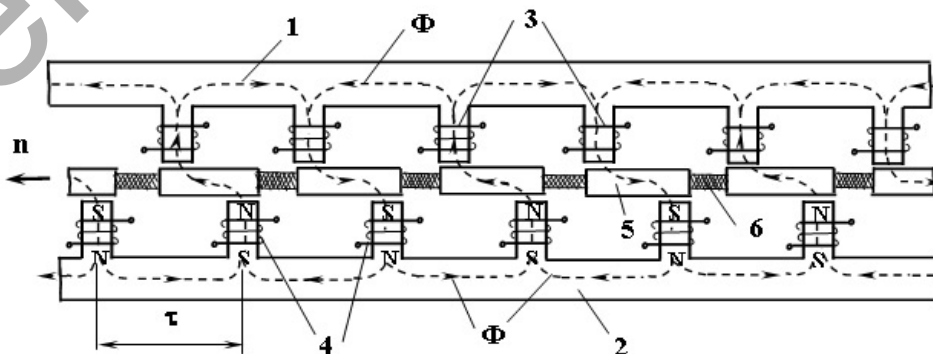


Рис. 2. Схема низкооборотного торцевого генератора коммутаторного типа

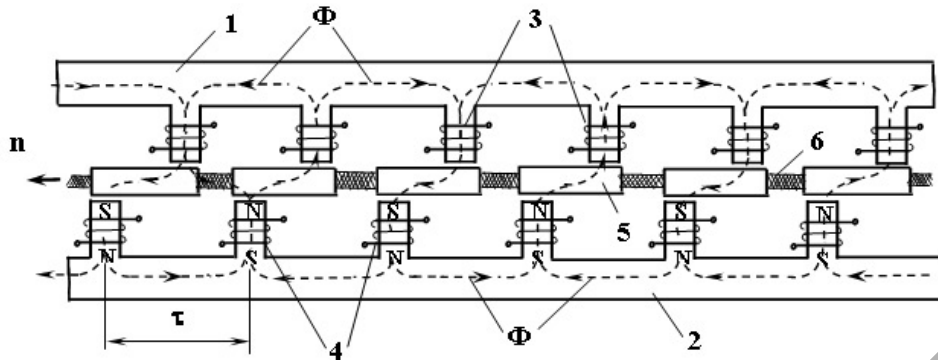


Рис. 3. Положение ротора относительно статора

На рисунке 3 представлена развернутая схема низкооборотного торцового генератора коммутаторного типа с обмоткой возбуждения при повороте ротора на половину одного полюсного деления τ .

Низкооборотный торцовый генератор работает следующим образом. Магнитные потоки Φ от обмоток возбуждения ($N-S$) замыкаются через сердечник ротора 5 и через выступы сердечника статора 1 и 2. Эти магнитные потоки Φ двух полюсов генератора и наводят электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора 3. При повороте ротора (рис. 3) на половину одного полюсного деления τ магнитные потоки Φ от обмоток возбуждения или постоянных магнитов ($N-S$) будут иметь обратное направление, замыкаясь через выступы статора 1 и 2, также образуя магнитный поток Φ генератора и наводя электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора 3 обратной полярности. При дальнейшем повороте ротора (рис. 2) магнитные потоки Φ от обмоток возбуждения 4 или постоянных магнитов ($N-S$) будут иметь первоначальное направление, замыкаясь через выступы статора 1 и 2 и наводя электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора 3 прямой полярности.

Таким образом, при вращении ротора происходит периодическое изменение направления магнитного потока в обмотках статора и наведение электродвижущей силы (ЭДС) переменного тока.

В данных генераторах цикл изменения магнитного потока, соответствующего одному периоду изменения ЭДС в обмотке статора, определяется поворотом ротора на одно полюсное деление. Поэтому частота ЭДС наводимого в обмотке статора будет равна

$$f = 2 \cdot n \cdot p, \quad (2)$$

где p — число пар полюсов обмоток возбуждения или постоянных магнитов; n — частота вращения ротора.

Как видно из последнего выражения, частота напряжения по сравнению с обычным генератором увеличена в два раза, поэтому, увеличивая число постоянных магнитов и уменьшая частоту вращения ротора, можно получить промышленную частоту напряжения.

Дополнительный второй статор, который используется в качестве системы возбуждения, позволяет увеличить не только число витков якоря основного статора, но и сечение проводов и тем самым увеличить значение напряжения и тока нагрузки, т.е. мощность генератора при заданном объеме машины и частоте вращения ротора. Кроме того, такая конструкция генератора по сравнению с традиционными конструкциями значительно проще в изготовлении и позволяет увеличить мощность генератора при уменьшении частоты вращения ротора.

С целью подтверждения принципа работы данного генератора был изготовлен макетный образец такого генератора на базе однофазного асинхронного двигателя мощностью 120 Вт. Результаты экспериментальных исследований показали, что условие (2) соблюдается, и принцип работы генератора коммутаторного типа подтверждается. Генератор с сердечником ротора из массивной стали показал хорошие технические результаты по сравнению с шихтованным. Также были сняты экспериментальные характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика. Эти характеристики показывают, что данный генератор коммутаторного типа работает как синхронный генератор, но более устойчиво.

Кроме того, результаты экспериментальных исследований подтвердили основные методы расчета и проектирования таких генераторов, которые были разработаны специально для ветроэлектрических станций.

Особенностью конструкции 2-го варианта низкооборотного генератора является то, что данный вариант разработан с одним статором. Генератор с постоянными магнитами (рис. 4) состоит из тор-

цового статора 1, и по окружности расположены полюсные выступы с обмоткой якоря 2. В качестве возбуждения использованы постоянные магниты ($N-S$), при этом полярность магнитных потоков должна чередоваться в прямой последовательности.

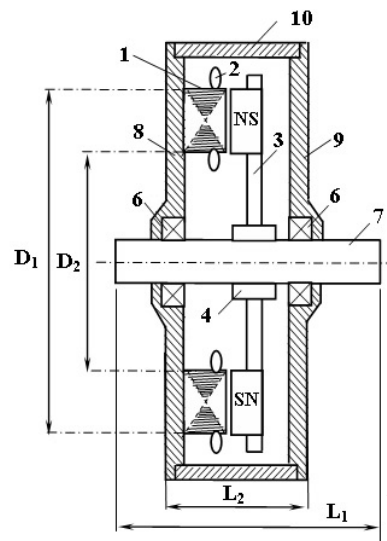


Рис. 4. Синхронный низкооборотный торцовый генератор с одним статором (2-вариант)

К шихтованному сердечнику статора 1 примыкает ротор 3, по окружности которого находятся постоянные магниты ($N-S$), имеющие с двух сторон вставки 4 из магнитных материалов, которые расположены по окружности ротора и изолированы друг от друга воздушным зазором (рис. 5). Ротор с помощью втулки 4 соединен с валом 7, на которых посажены подшипники 6. Шихтованный сердечник статора 1 закреплен на передней стенке крышки 8 и с помощью задней крышки 9 крепится к корпусу 10.

Синхронный низкооборотный торцовый генератор работает следующим образом. Магнитные потоки Φ от постоянных магнитов ($N-S$) с помощью магнитных вставок 5 направляются на выступы сердечника статора 1, образуя при этом магнитный поток Φ генератора и наводя электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора 2.

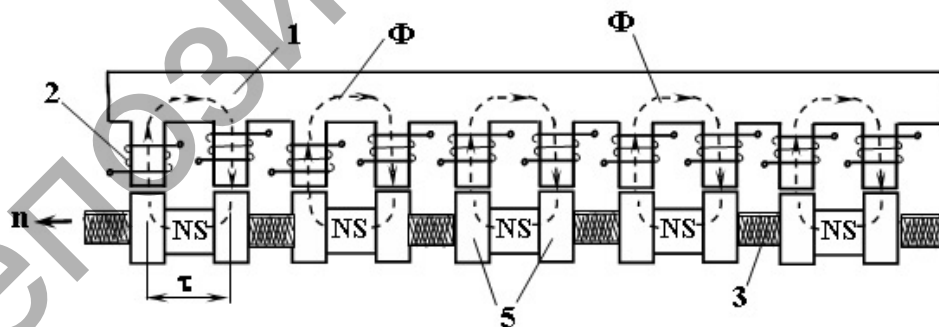


Рис. 5. Положение постоянных магнитов и ротора

При повороте ротора (рис. 5) на одно полюсное деление τ магнитные потоки Φ от постоянных магнитов ($N-S$) будут иметь обратное направление, замыкаясь через выступы статора 1, также образуя магнитный поток Φ генератора и наводя электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора обратной полярности. При дальнейшем повороте ротора (рис. 6) магнитные потоки Φ от постоянных магнитов ($N-S$) будут иметь первоначальное направление, замыкаясь через выступы статора 1 и наводя электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора 2 прямой полярности.

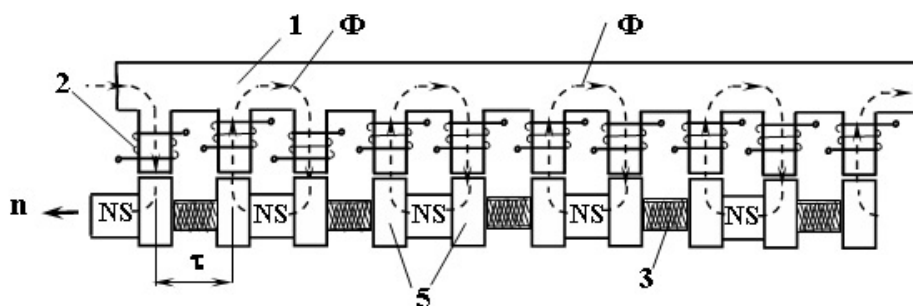


Рис. 6. Изменение положений постоянных магнитов и ротора

В данном разработанном генераторе цикл изменения магнитного потока, соответствующий одному периоду изменения ЭДС в обмотке статора определяется поворотом ротора на одно полюсное деление. Поэтому частота ЭДС наводимого в обмотке статора будет равна

$$f = n \cdot p. \quad (3)$$

На рисунке 7 представлено фото низкооборотного генератора для ветроэнергетической установки. Статорные выступы были разделены на 12 равных частей и выполнены пазы, на которых располагались обмотки. При статорных выступах $z = 6$ для промышленной частоты $f = 50$ Гц достаточно частоты вращения ротора $n = 500$ об/мин. Постоянные магниты располагались в одной конструкции на статоре, а другой — на роторе. Один сердечник ротора был выполнен шихтованным, а второй — из массивной стали.

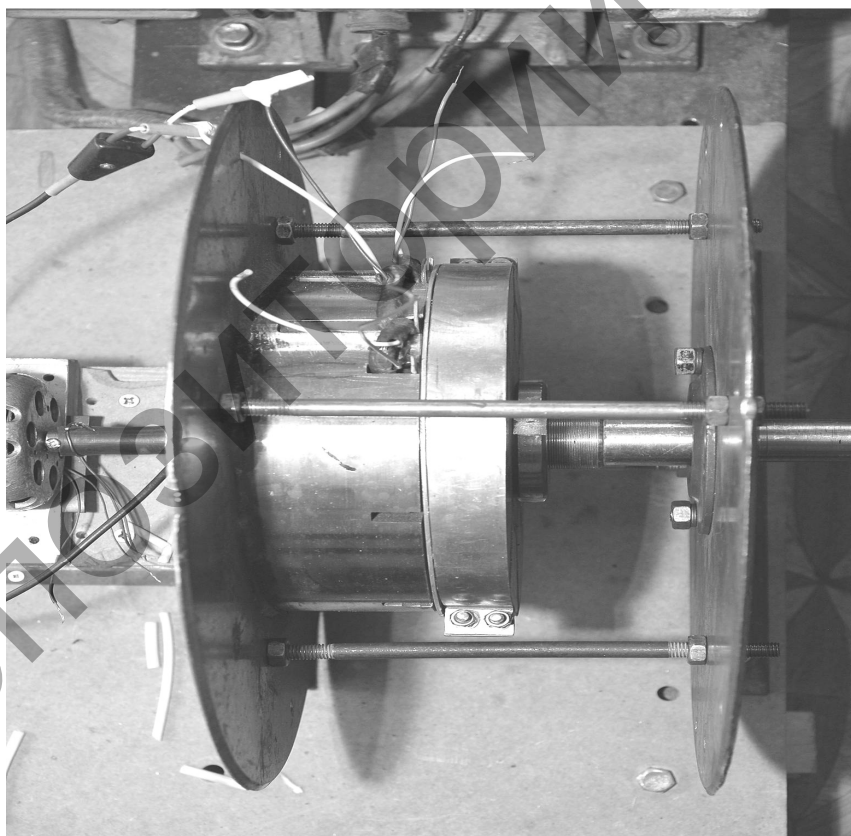


Рис. 7. Низкооборотный торцовый генератор

Таким образом, нами был разработан, изготовлен и собран оптимальный торцовый генератор (СНТГ-2). Торцовое исполнение статора позволяет увеличить не только число витков якоря, но и сечение проводов и тем самым увеличить значение тока генератора, т.е. мощность генератора при заданном объеме машины и частоте вращения ротора. Кроме того, такая конструкция генератора по сравнению с традиционными конструкциями значительно проще в изготовлении и позволяет увеличить мощность генератора при уменьшении частоты вращения ротора.

Список литературы

1. *Фатеев Е.М.* Ветро двигатели и ветроустановки. — М., 1957. — 533 с.
2. *Фатеев Е.М.* Ветро двигатели и их применение в сельском хозяйстве. — 1962. — 246 с.; *Войцеховский Б.В.* Перспективные источники энергии и их сравнение с используемыми // Журнал прикладной механики и технической физики. — М.: Наука, 1980. — № 5.
3. *Шефтер Я.И.* Использование энергии ветра. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 200 с.
4. *Волошаник В.В., Зубарев В.В., Франкфурт М.О.* Использование энергии ветра, океанских волн, течений // Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. — 1983. — 100 с.
5. *Гимбарский Е.К., Пильганчук А.В., Поверчук В.А.* Многофункциональные ВЭУ для индивидуального потребления // Энергетика и электрификация. — 2000. — № 12. — С. 32–34.
6. *Исембергенов Н.Т.* Асинхронизированный генератор // Патент РК. № 6428. Оpubл. в Б.И. — 1998. — № 6.
7. *Исембергенов Н.Т., Сыздыков Д.Ж., Сматов К.С. и др.* Низкоорбитальный асинхронизированный генератор для гидро-ветроэлектрических установок // Патент РК. № 980459. Оpubл. в Б.И. — 2000. — № 2.