

УДК 621.313

Петренко А. Н., канд. техн. наук,
Плюгин В. Е., канд. техн. наук,
Петренко Н. Я., канд. техн. наук,
Шайда В. П., канд. техн. наук.

РАЗРАБОТКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Аннотация: Представлена методика расчета и выбора параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами при известной геометрии статора базового асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Приведены результаты проектирования и математического моделирования синхронного двигателя с постоянными магнитами. Выполнен анализ энергетической эффективности разработанного двигателя.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, синхронный двигатель, постоянные магниты, методика, проектирование, математическое моделирование.

Петренко О. М., канд. техн. наук,
Плюгин В. Е., канд. техн. наук,
Петренко М. Я., канд. техн. наук,
Шайда В. П., канд. техн. наук.

РОЗРОБКА СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Анотація: Представлена методика розрахунку і вибору параметрів синхронного двигуна з постійними магнітами при відомій геометрії статора базового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Наведено результати проектування і математичного моделювання синхронного двигуна з постійними магнітами. Виконаний аналіз енергетичної ефективності розробленого двигуна.

Ключові слова: Асинхронний двигун, короткозамкнений ротор, синхронний двигун, постійні магніти, методика, проектування, математичне моделювання.

Petrenko O. M., PhD,
Pliugin V. E., PhD,
Petrenko M. Y., PhD,
Shaيدا V. P., PhD.

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DEVELOPMENT ON THE BASE OF INDUCTION MOTOR WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR

Abstract: Permanent magnet synchronous motor calculation methodology and parameters choosing at the known geometry of the base induction motor with squirrel cage rotor stator is represented. Design and simulation results of the permanent magnet synchronous motor are shown. The analysis of power efficiency of the developed motor is done.

Key words: induction motor, short-circuited rotor, synchronous motor, permanent magnets, methodology, design, mathematical modelling.

Введение. В наши дни асинхронные двигатели (АД) массово используются в электроприводе лифтовых лебедок, насосных и вентиляторных установках и пр. Однако, в некоторых электроприводах наблюдается тенденция замены АД синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ). Это объясняется тем, что СДПМ, позволяя уменьшить потери в электрической машине, по сравнению с асинхронными двигателями, т.е. имеют больший КПД.

При одинаковых значениях номинальной мощности габаритные размеры СДПМ будут меньше, чем у АД. Указанная тенденция имеет практическое обоснование в свете мирового тренда – энергосбережения.

Методики проектирования СДПМ широко известны и проблем, связанных с созданием таких двигателей, не должно возникать [1, 3, 7–8]. Однако, потребители не желают вносить изменения в габариты существующих установок, и производители их

только поддерживают в этом. Поэтому было найдено решение, которое уже применялось в машинах постоянного тока: использовать для СДПМ корпус и сердечник статора существующего АД. Таким образом, можно оставить габариты двигателя неизменными и улучшить его энергетические показатели и характеристики.

Цель работы. Целью работы является разработка методики расчета СДПМ, с использованием сердечника статора АД такой же мощности, как и СДПМ. Проведение сравнительного анализа электромеханических характеристик спроектированного двигателя.

Отличия используемой методики расчета СДПМ. В качестве исходных были использованы методики проектирования и научные работы, в том числе и авторов статьи [2]. Расчет синхронного двигателя выполняется из допущения, что известны геометрические размеры статора и его зубцовой зоны. Также неотъемлемой частью методики проектирования становится определение электромеханических характеристик.

Номинальное напряжение, режим работы и номинальная частота вращения определяются техническими условиями на двигатель. Далее рассмотрим основные этапы расчета.

Расчет электромагнитных нагрузок и обмотки. Задача состоит в определении электромагнитных нагрузок СДПМ, расчета обмоточных данных и нахождении проектной мощности.

Проектная мощность двигателя P_N определяется статическим моментом на валу M_N и номинальной частотой вращения n_N .

По рекомендациям, изложенным в [1–4], предварительно принимаем КПД η_N и коэффициент мощности $\cos\varphi_N$.

Определяем коэффициент режима работы k_{dm} , который учитывает коэффициент превышения температуры k_t , коэффициент режима продолжительности включения ПВ k_{pv} , коэффициент запаса k_s для механизмов подъема и перемещения, а также коэффициента k_r – учитывающий наличие релейно-контакторной системы управления [2]:

$$k_{dm} = \frac{k_r}{k_t \cdot k_{pv} \cdot k_s}. \quad (1)$$

На основании полученных данных рассчитываем номинальный ток в фазе двигателя

$$I_N = \frac{P_N \cdot k_{dm}}{m \cdot U_{Nf} \cdot \eta_N \cdot \cos\varphi_N}, \quad (2)$$

где U_{Nf} – номинальное фазное напряжение; m – число фаз.

Предварительно принимаем величину магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ по [7] и находим магнитный поток

$$\Phi_\delta = \frac{2B_\delta DL_\delta}{p}, \quad (3)$$

где D – внутренний диаметр статора; L_δ – длина пакета статора; p – число пар полюсов.

Найденное по (3) значение магнитного потока в воздушном зазоре машины позволяет определить количество витков в фазе обмотки статора

$$W = \frac{k_e U_N}{4.44 \cdot k_w \cdot f_N \cdot \Phi_\delta}, \quad (4)$$

где k_e – коэффициент уменьшения ЭДС; k_w – предварительное значение обмоточного коэффициента; f_N – частота питающего напряжения U_N при номинальной скорости.

Далее находим число проводников в пазу при числе параллельных ветвей a и числе пазов на полюс и фазу q , которые могут быть приняты в первом приближении как в базовом асинхронном двигателе:

$$N_p = \frac{W \cdot a}{q \cdot p}. \quad (5)$$

Для достижения высокого значения КПД плотность тока в обмотке статора не должна превышать 4 – 5 А/мм².

По известной величине номинального тока, которая найдена по (2), и заданной плотности тока, находится сечение проводника обмотки.

В качестве контроля правильности выбора обмоточных данных выполняется оценка величины линейной нагрузки

$$A = \frac{Z \cdot N_p \cdot I_N}{\pi D \cdot a}. \quad (6)$$

Проверяем значение линейной нагрузки, которое в СДПМ общепромышленного назначения не должно превышать 30000 А/м.

Параметры базового (заменяемого) асинхронного двигателя. В качестве машины-прототипа (базового двигателя) был выбран двухполюсный АД с короткозамкнутым ротором мощностью 2,2 кВт, номинальным напряжением 18 В. Частота сети питания – 65 Гц. Основные параметры базовой машины приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Данные базового АД

Наименование параметра	Значение
Число пазов статора	24
Число параллельных ветвей	2
Число пазов на полюс и фазу	4
Число эффективных проводников в пазу	7
Число параллельных проводников	7
Диаметр голого провода, мм	1,0
Высота немагнитного зазора, мм	0,4

Разработка конструкции синхронного двигателя. В результате расчета были определены параметры обмотки статора, основные параметры которой представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Данные обмотки статора СДПМ

Наименование параметра	Значение
Число параллельных ветвей	2
Число пазов на полюс и фазу	2
Число эффективных проводников в пазу	3
Число параллельных проводников	13
Диаметр голого провода, мм	1,06

На ротор двигателя были установлены постоянные магниты из сплава неодим-железо-бор (NdFeB35). Число магнитов (полюсов) – 4, размеры магнита: толщина – 2,5мм и ширина – 40мм. Высота немагнитного зазора 0,4 мм.

Результаты расчета и моделирования синхронного двигателя. Расчет СДПМ выполнялся в программе Ansys RMxprt. Исходные геометрические размеры, обмоточные данные и величина питающего напряжения были автоматически сконфигурированы в модуле оптимизации Optimetrics с критерием оптимальности – максимальный КПД.

Сравнительные показатели базового АД и рассчитанного СДПМ приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Сравнительные показатели АД и СДПМ

Наименование	АД	СДПМ
Мощность, кВт	2,2	2,2
Напряжение фазное, В	18	18
Частота сети, Гц	65	130
Ток фазный, А	52,2	80,7
Число полюсов	2	4
Частота вращения Номинальная, об/мин	3826	3900
Момент на валу, Нм	5,49	5,38
КПД, %	84,7	88,8
cos φ	0,914	0,985
Линейная нагрузка, А/м	17026	11300
Кратность пуск. тока	9,2	1,2

Как видно из табл. 3, СДПМ имеет улучшенные, по сравнению с АД, технико-экономические показатели.

Расчеты выполнялись при условии постоянства частоты вращения, что обеспечивается системой управления [5–6]. Критерием правильности расчета СДПМ является получение при поддерживаемой системой управления номинальной частоты вращения мощности на валу, равной своему номинальному значению. Как видно из табл. 3, спроектированный СДПМ удовлетворяет всем контрольным критериям. На рис. 2 приведена зависимость КПД от угла нагрузки.

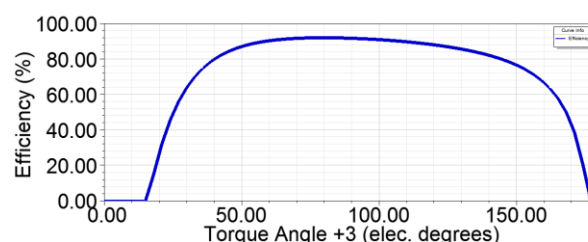


Рис. 2 – Зависимость КПД от угла нагрузки

Расчет распределения электромагнитного поля, а также анализ электромеханического переходного процесса пуска двигателя выполнялся в программе Ansys Maxwell 2D [10]. Картина магнитно-силовых линий в сечении СДПМ приведена на рис. 3.

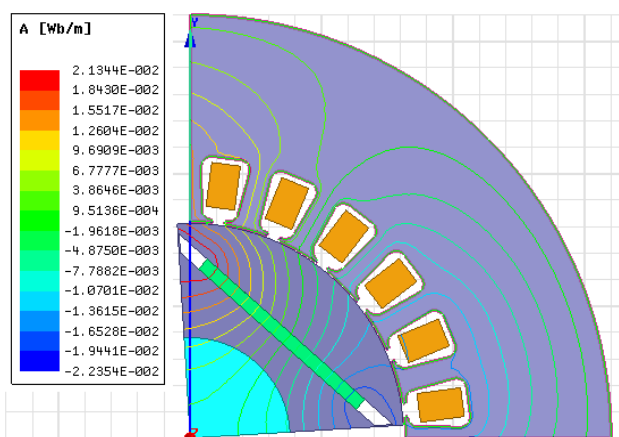


Рис. 3 – Распределение векторного магнитного потенциала в СДПМ

Математическое моделирование электромеханического переходного процесса пуска двигателя выполнялось в программе Ansys Simplorer [10] с использованием расчетного объекта двигателя, полученного в RMXprt. Результаты математического моделирования представлены на рис. 4.

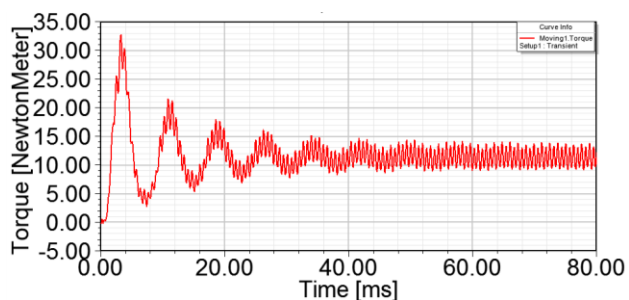


Рис. 4 – Изменение момента на валу при пуске СДПМ

Файл проекта RMXprt был экспортирован в программу MotorCAD для выполнения теплового расчета СДПМ [9]. Выполненный тепловой расчет показал, что максимальное превышение обмотки статора в установившемся режиме при вращении ротора с номинальной скоростью не превышает 70 °С.

Выводы.

1. Разработана методика проектирования СДПМ, основанная на работах [1–8], использующая в качестве исходных (заданных) данных геометрию сердечника статора и учитывающая электромеханические характеристики в качестве одного из критериев эффективности двигателя.

2. СДПМ показал более высокий КПД и перегрузочную способность, чем базовый АД в том же конструктивном исполнении, что подтверждает целесообразность модернизации существующего парка АД в СДПМ для систем электропривода народного хозяйства – от лифтовых лебедок до городского транспорта.

3. В настоящее время запланировано изготовление разработанного СДПМ на ООО «Спецэнергосервис», г. Харьков.

Список использованной литературы

1. Яковлев А.И. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах [Текст]: учеб. пособие по курсовому проектированию / А.И. Яковлев, М.А. Затучная, В.Н. Меркушев, В.Н. Пашков. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 125 с.
2. Плюгин В.Е. Расчет частотно-регулируемых электроприводов механизмов металлургических кранов [Текст] / В.Е. Плюгин, Д.А. Гребенюков // Сб. науч. прац ДонДТУ. – 2009. – Вип. 29. – С. 354–360.
3. Пахомин С.А. Проектирование синхронных генераторов [Текст]: учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике / С.А. Пахомин. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 91 с.
4. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
5. Hendershot, J.R. and Miller T.J.E. Design of Brushless Permanent Magnet Machines 2nd Edition, p. 44, Motor Design Books LLC, 2010.
6. Yung-Kang Chin. Electrical machines and power electronics department of electrical engineering / Royal institute of technology Sweden, 2004. – 95 p.
7. Soleimani Keshayeh, M.J. Optimum Design of a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for industrial applications / M.J. Soleimani Keshayeh, S. Asghar Gholamian // International Journal of Applied Operational Research, 2013. – Vol. 2. – No. 4. – pp. 67–86.

8. David G. Dorrell, Mircea Popescu. Drive Motor Designs for Electric Motorcycles / IEEE, 2012. – p.p. 4354–4361.

9. Motor-CAD v7.4 Manual / Motor-CAD Ltd, 2013.

10. Ansys Maxwell 15.0 2D Complete Edition / ANSYS Inc., 2012. – 628 p.

Получено 30.04.2016.

References

1. Jakovlev A.I., Zatchnaja M.A., Merkushev V.N., Pashkov V.N. Raschet i proektirovanie vetro-jelektricheskikh ustanovok s gorizontal'no-osevoj vetroturbinoy i sinhronnym generatorom na postojannyh magnitah [Calculation and design of wind power plants with a horizontal-axis wind turbine and synchronous generator with permanent magnets], (2003), Kharkov, Ukraine, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” *Publ.*, 125 p. (In Russian).

2. Pljugin V.E., Grebenjukov D.A. Raschet chastotno-reguliruemym jelektroprivodov mehanizmov metallurgicheskikh kra-nov [Calculation of variable frequency drives metallurgical cranes mechanisms], (2009), *Sb. nauk. prac' DonDTU. Publ.*, Donetsk, Ukraine, Vol. 29, p.p. 354–360. (In Russian).

3. Pahomin S.A. Proektirovanie sinhronnyh generatorov [Design of synchronous generators], (2007), Novocherkassk, Russian, JuRG TU *Publ.*, 91 p. (In Russian).

4. Kopylov I.P. Proektirovanie jelektricheskikh mashin [Design of electrical machines], (2011), Moscow, *Jurajt Publ.*, 767 p. (In Russian).

5. Hendershot, J.R. and Miller T.J.E. Design of Brushless Permanent Magnet Machines 2nd Edition, (2010), *Motor Design Books LLC*, 2010, p. 44. (In English).

6. Yung-Kang Chin. Electrical machines and power electronics department of electrical engineering, (2004), *Royal institute of technology Sweden*, 95 p. (In English).

7. Soleimani Keshayeh, M.J., Asghar Gholamian, S. Optimum Design of a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for industrial applications, (2013), *International*

Journal of Applied Operational Research, Vol. 2., No. 4., pp. 67–86. (In English).

8. David G. Dorrell, Mircea Popescu. Drive Motor Designs for Electric Motorcycles, (2012), *IEEE*, p.p. 4354–4361. (In English).

9. Motor-CAD v7.4 Manual, (2013) *Motor-CAD Ltd.*, (In English).

10. Ansys Maxwell 15.0 2D Complete Edition, (2012), *ANSYS Inc.*, 628 p. (In English).



Петренко Александр Николаевич
канд. техн. наук, доцент,
доцент каф. электрического транспорта, ХНУ городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, г. Харьков, 61002, ул. Бажанова, 17, тел. +38 057 706 15 48,
E-mail:
petersanya2007@mail.ru



Плюгин Владислав Евгеньевич,
канд. техн. наук, доцент,
доцент каф. электрических машин НТУ «ХПИ», г. Харьков, 61002, ул. Кирпичева, 21. тел. +38 099-213-07-48
E-mail:
vlad.plyugin@gmail.com



Петренко Николай Яковлевич,
канд. техн. наук, доцент,
доцент каф. электрических машин НТУ «ХПИ», г. Харьков, 61002, ул. Кирпичева, 21.
E-mail: pet-nic-ya@ukr.net



Шайда Виктор Петрович,
канд. техн. наук, доцент,
доцент каф. электрических машин НТУ «ХПИ», г. Харьков, 61002, ул. Кирпичева, 21.
E-mail:
victor-shayda@yandex.ru