

К ВОПРОСУ О ПЕРЕХОДЕ КООРДИНАТНЫХ ПРИВОДОВ СИСТЕМ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ НА НОВЫЕ ТИПЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова

В условиях возникновения новых, потенциально более качественных электрических двигателей, а также систем управления ими возникает задача осуществления сравнительного анализа различных типов электродвигателей. Статья базируется на комплексном обзоре литературы и сравнении характеристик четырех основных видов электрических двигателей, использующихся по всему миру в области самонаводящихся систем слежения за Солнцем. Данный анализ позволит выбрать наиболее подходящий электромотор для координатного привода системы слежения за Солнцем или сделать вывод о целесообразности использования того или иного типа электрической машины в составе электропривода.

Ключевые условия: электрическая машина, электрический двигатель, система слежения за Солнцем, коллекторный двигатель постоянного тока, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, шаговый двигатель, реактивно-вентильный двигатель.

Введение

Электродвигатель (ЭД) является одним из ключевых узлов электротехнического комплекса гелиоэнергетической установки (ЭТК ГУ), управле-

ние которым обеспечивает не только динамичное, но и безопасное (для ЭТК ГУ) движение в пространстве и адекватное значение вырабатываемой электроэнергии [1]. Но традиционно используемые двигатели постоянного тока (ДПТ) [2, 3, 4, 5, 6] и шаговые двигатели (ШД) [4, 5, 7, 8, 9] отличаются достаточно низкой надёжностью (что обеспечивается наличием щёточно-коллекторного узла у ДПТ) и невысокими эксплуатационными характеристиками в целом (невозможность противостоять высоким ветровым нагрузкам у ШД).

Это особенно заметно при работе ЭТК ГУ в сложных погодных условиях, которые накладывают ограничения на режимы работы координатных приводов и заставляют инженера проектировщика искать адекватные решения выхода из сложившейся ситуации. Переход на новые типы электрических машин является не только выходом, но и рациональным путем повышения эксплуатационной надёжности, а также уменьшения энергопотребления (благодаря более высокому коэффициенту полезного действия (КПД) у вентильно-индукторного реактивного двигателя (ВИРД)).

Достоинства и недостатки различных типов двигателей

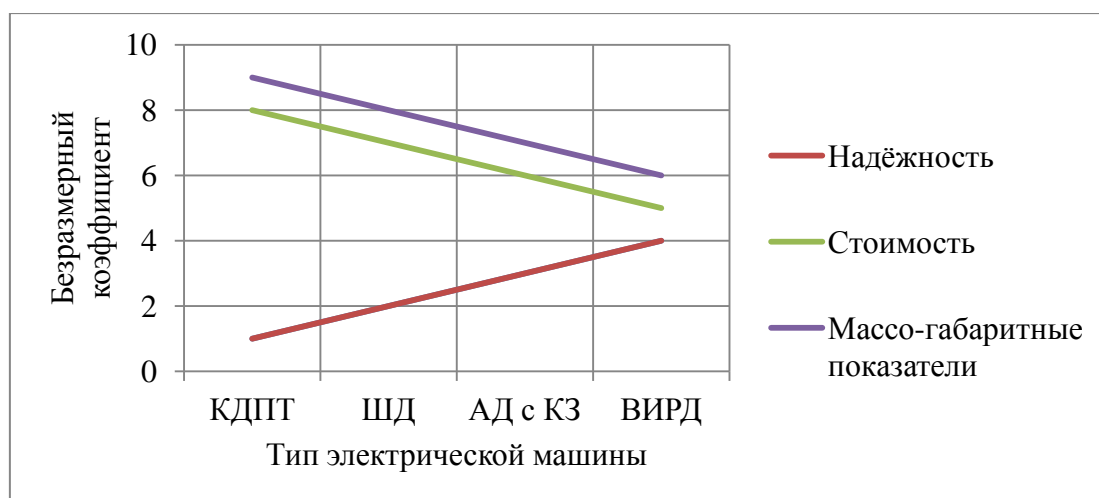
Правильный выбор электрического двигателя – важный шаг при проектировании ЭТК ГУ. Его тип определяется на одной из начальных стадий проектирования. Электрический двигатель должен быть (для приводимого в движение объекта) не просто одним из узлов, но и практически идеальным источником управляемого момента (силы) или скорости [10].

Основные требования, предъявляемые к двигателям для ЭТК ГУ: они должны выдерживать высокие температуры, высококоррозионные солевые распыления, ветровые нагрузки, влажность и грубые частицы воздуха, плюс к этому они должны иметь высокий КПД, легкость и плавность регулирования скорости и момента, высокие массогабаритные показатели, высокую перегрузочную способность для противостояния ветровым нагрузкам, надежность, простоту, удобство обслуживания, невысокую стоимость и долговечность.

Существует достаточно много типов электродвигателей, которые могут стать основой для координатных электроприводов систем слежения за Солнцем. В настоящее время в области самонаводящихся систем слежения за Солнцем по всему миру используется несколько типов двигателей [4]:

- 1) коллекторный двигатель постоянного тока (КДПТ);
- 2) шаговый двигатель (ШД);
- 3) асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД с КЗ);
- 4) вентильный двигатель и его разновидности (реактивно-вентильная электрическая машина (РВЭМ, ВИРД)).

На рис. показана условная динамика основных характеристик старых и относительно новых типов электрических машин.



Условная динамика основных характеристик электрических машин

Показано, что по мере создания новых электрических машин их надёжность повышается, а стоимость и массо-габаритные показатели снижаются.

Тем не менее обзор различных типов электрических машин, пригодных для ЭТК ГУ, показал, что самые распространённые электроприводы ЭТК ГУ на базе ДПТ [2, 3, 4, 5, 6] и шаговых двигателей (ШД) [4, 5, 7, 8, 9, 13], несмотря на то, что не удовлетворяют в полной мере указанным требованиям, используются до сих пор.

Это не позволяет назвать вопрос выбора типа и конструкции электрической машины в полной мере однозначным и окончательным [4]. Причина этого заключается в недостаточной проработке вопросов касательно координатных приводов с другими типами машин.

Обратим внимание на анализ источников. Благодаря тому, что фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) вырабатывает постоянное напряжение, наиболее легко сопряжение ЭТК ГУ осуществляется с КДПТ [3, 11, 12].

Он имеет широкий диапазон регулировки скорости, его легко контролировать, они могут работать достаточно продолжительное время (около 5000 ч до капитального ремонта), обладают высокой перегрузочной способностью, благодаря чему можно противостоять высоким ветровым нагрузкам [3, 11–12]. Создание электроприводов солнечных установок на базе постоянного тока рассмотрено в [3].

Возникновение и совершенствование новых, потенциально более качественных электрических машин, а также систем управления ими, ставит под вопрос целесообразность дальнейшего применения КДПТ [14], особенно с учётом его недостатков: время от времени он требует обслуживания, а наличие щёточно-коллекторного узла и трущиеся механические части усложняют эксплуатацию гелиоустановки с подобными двигателями [1, 13]. Кроме того, он дороже в изготовлении и обладает наихудшими массо-габаритными показателями в сравнении с другими двигателями.

Дискретный привод с ШД имеет достаточно невысокую стоимость и для точного управления положением не требуется синтез замкнутой системы управления (см. «пассивные контроллеры») [4, 13, 15], но он не имеет возможности перегрузки [8, 13].

Поскольку ШД фактически не обладает перегрузочной способностью, в условиях воздействия высоких ветровых нагрузок потребуются гораздо больший (избыточный) размер ШД. В этом случае, возможен эффект «ступенчатой ошибки» или полной блокировки, когда стартовая нагрузка (нагрузочный момент) чрезмерно высока.

В некоторых случаях, обуславливающих повышенные требования по устойчивости движения, быстродействию и надёжности, следует отдавать предпочтение иным типам двигателей [4].

Вполне очевидной заменой ДПТ и ШД может стать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД с КЗ) [4, 16–18] с векторным управлением или прямым управлением моментом (Direct torque Control – DTC). При наличии настроенной системы управления (привод может быть настроен и иметь «контур позиции» и «контур скорости» – аналог систем подчинённого регулирования) АД с КЗ не уступают по регуливающим свойствам КДПТ, хотя в то же время обладают лучшими массогабаритными показателями, не требуют высоких затрат на обслуживание, имеют хорошую надёжность и долговечность [4, 17]. Кроме того, система координатных приводов переменного тока не будет иметь эффект «ступенчатой ошибки», т.к. имеет достаточный максимальный выходной крутящий момент ($M_{\max}/M_{\text{ном}} \approx 3$), запас которого можно использовать для преодоления инерционной и ветровой нагрузки, поэтому эта система более надёжна, чем система с КДПТ и ШД. К примеру, Siemens выпускает продукцию для гелиоустановок на основе двигателей переменного тока [19, 20]. Существует ряд публикаций, в которых в качестве приводного двигателя используется асинхронный двигатель [16–18, 21, 22].

К числу недостатков нельзя отнести использование для этого двигателя внутренних системных сенсоров (например, энкодеров), необходимых для создания замкнутой СУЭП, хотя это и несколько повышает конечную стоимость привода. Отметим, что энкодер можно установить на выходном вале редуктора (с целью получения сигнала положения приёмной поверхности в пространстве), только в этом случае система может испытывать значительное влияние двухмассовости системы [13]. Существенным недостатком координатных приводов с АД с КЗ можно назвать некоторое снижение КПД при работе двигателя в зоне низких скоростей (что является одной из особенностей ЭКТ ГУ). Итоговая стоимость такого привода (со всем оборудованием, включая силовые преобразователи, двигатели, сенсоры и др.) может быть достаточно высокой, что пока сдерживает их применение для координатных приводов ЭТК ГУ. Тем не менее успехи си-

ловой электроники позволяют оправдать их использование в будущем (при условии решения ряда проектно-конструкторских, эксплуатационных и экономических вопросов). Следует помнить, что стоимость привода переменного тока постепенно снижается в последние годы.

Сервопривод переменного тока мог бы стать новым техническим стандартом, доминантом в вопросе создания координатных приводов ЭТК ГУ, однако с ним конкурирует получивший определённое развитие в последние 3–5 лет электропривод на базе реактивно-вентильных индукторных двигателей.

Данные двигатели обладают даже большей надёжностью и простотой устройства, чем асинхронный двигатель [14]. Кроме того, КПД вентильного реактивного двигателя несколько выше асинхронного двигателя. По основным рабочим характеристикам он не уступает КДПТ. ВИРД имеют улучшенные массо-габаритные показатели. Конструкция ротора позволяет снизить электромеханическую постоянную времени, т.е. уменьшить его инерционность.

Благодаря тому, что для питания обмоток ВИРД необходимы импульсы напряжения, возможно осуществить настолько же удобное сопряжение с ФЭП, как и у КДПТ, при этом топологии преобразователей будут похожи. Вышесказанное, с учётом достоинств ВИРД, делает его основным кандидатом на тип электродвигателя для координатных электроприводов. Однако это произойдёт при условии, что его удастся превратить в практически идеальный источник момента (скорости). Причина этого замечания в том, что такие двигатели обладают существенным недостатком: из-за зубчатой формы ротора работа сопровождается повышенным уровнем колебаний электромагнитного момента. В силу того, что работа современного вентильно-индукторного электропривода подразумевает работу при переменной нагрузке, со сложными законами регулирования момента и скорости, необходимо предусмотреть систему снижения колебания электромагнитного момента ВИРД.

В России применению ВИРД в системах слежения за Солнцем посвящены ряд работ [23, 24].

За рубежом этот вопрос практически не рассматривался, за исключением [14]. В этих работах в полной мере не рассмотрен ряд важных вопросов: проектирование двигателя под конкретные условия эксплуатации, глубокое математическое моделирование и исследование переходных процессов, работа в зоне инфранизких скоростей, снижение колебательности момента.

Таким образом, можно выделить два основных типа двигателя, которые следует рассмотреть в качестве основы координатного привода: АД с КЗ и ВИРД. КДПТ и ШД были временно исключены из данного списка из-за своей дороговизны (у КДПТ) и низких эксплуатационных свойств (у ШД). В исследованиях по электроприводу ЭТК ГУ, которые будут осуществ-

ляться авторами в дальнейшем, с учётом перехода координатных приводов на новые типы электрических машин должны быть рассмотрены следующие вопросы, относящиеся:

- к структуре, динамическим и точностным показателям гелиоустановок;
- к динамике и системе управления;
- к учету нелинейностей редукторного СЭП, компенсации влияния люфта и синтезу СУЭП;
- к вопросу повышения энергетических показателей и снижения электрических потерь в электроприводе с учётом особенностей тихоходных следящих приводов.

Заключение

Каждый из вышеприведённых ЭД обладает своими достоинствами и недостатками. Тем не менее новые типы ЭД на основе АД с КЗ и ВИРД способны выполнить основные требования, предъявляемые к приводам ЭТК ГУ по энергетическим показателям, перегрузочной способности, диапазону регулирования скорости и момента, надёжности, долговечности, простоты обслуживания и ценового фактора. Выбор электрической машины является чрезвычайно важным этапом в создании и исследовании новых типов координатных приводов, что будет осуществляться авторами в следующих работах при рассмотрении проектно-конструкторских, эксплуатационных и исследовательских вопросов [25].

Библиографический список

1. Сологубов, А.Ю. Виртуальная имитационная модель электромеханической системы на примере азимутального привода постоянного тока для исследования гелиоэнергетических установок / А.Ю. Сологубов // Силовая электроника. – 2018. – Т. 1. – С. 64–69.
2. Аббасова, Т.С. Повышение качества регулирования мощности в системе электроснабжения с солнечной батареей / Т.С. Аббасова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2010. – Т. 2, № 6. – С. 3–9.
3. Овсянников, Е.М. Электроприводы гелиоустановок наземного и космического базирования. Теория и практика: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е.М. Овсянников. – М., 2003. – 40 с.
4. Liang W., Wang Z. Several experiences on automatic sun tracking system // Proc. ISES World Congr. 2007. Т. 1–4. Pp. 1768–1772.
5. Zhang Xinhong, Wu Zongxian, Yu Zhengda H.Y. Intelligent Solar Tracking Control System Implemented on an FPGA // Nios II Embed. Process. Des. Contest–Outstanding Des. 2007. Pp. 217–246.
6. Iqbal K. и др. Construction of Single Axis Automatic Solar Tracking System // Int. J. u- e- Serv. Sci. Technol. 2015. Т. 8, № 1. Pp. 389–400.
7. Mauro S., Biondi G. High Concentration Photovoltaic System with Parallel Kinematic Solar Tracker // Int. J. Appl. Eng. Res. 2016. Т. 11, № 19. Pp. 9715–9722.

8. Аржанов, К.В. Разработка структуры шагового электропривода для системы наведения фотоэлектрической установки при действии ветровой нагрузки / К.В. Аржанов, А.В. Аржанова // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность. – 2000. – С. 4–6.
9. Fathabadi H. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems // Appl. Energy. Elsevier Ltd, 2016. Т. 173. Pp. 448–459.
10. Цаценкин, В.К. Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями / В.К. Цаценкин. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 240 с.
11. Овсянников, Е.М. Электропривод энергетической гелиоустановки / Е.М. Овсянников // Привод и управление. – 2000. – Т. 2. – С. 5–7.
12. Овсянников, Е.М. Электрический привод / Е.М. Овсянников. – М.: ФОРУМ, 2011. – 225 с.
13. Аржанов, К.В. Автоматизированная система непрерывно-дискретного слежения за Солнцем автономных фотоэлектрических энергоустановок с использованием шаговых двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.В. Аржанов. – Томск, 2016. – 24 с.
14. Multon B., Multon B. Photovoltaic Motors Review, Comparison and Switched Reluctance Motor Prototype Photovoltaic Motors Review , Comparison and Switched Reluctance Motor Prototype // 2015 Tenth Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies. 2015. № March.
15. Деменкова, Т.А. Анализ и методика выбора алгоритмов для систем управления солнечными установками / Т.А. Деменкова, А.А. Финенко // Международная научно-техническая конференция «Информатика и Технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» («МНТК ФТИ-2017»). – 2017. – С. 306–309.
16. Lorenzo E. и др. Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis // Prog. Photovoltaics Res. Appl. 2002. Т. 10, № 8. Pp. 533–543.
17. Panda A., Pathak M.K., Srivastava S.P. Solar Direct Torque Controlled Induction Motor Drive for Industrial Applications // Int. J. Renew. Energy Res. 2013. Т. 3, № 4.
18. Unni A., Mini V.P. An Efficient Solar Powered Induction Motor Drive System // 2015 Int. Conf. Control. Commun. Comput. India. 2015. № November. Pp. 155–160.
19. Энергия солнца – Siemens.pdf [Электронный ресурс]. – URL: <http://m.energy.siemens.com/ru/ru/renewable-energy/solar-power/index.htm/>.
20. Solar Tracking – Machine Building – Siemens.pdf [Электронный ресурс]. – URL: <http://w3.siemens.com/markets/global/en/machinebuilding/solar-production-machines/solar-tracking/Pages/Default.aspx?ismobile=true>.
21. Bouzidi B., Yangui A., Salem F. Ben. The Classical and Analytic DTC for Photovoltaic Panel Position and Control // Int. J. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. 2008. № Special Issue. Pp. 636–651.
22. Wang J.M., Lu C.L. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system // Sensors (Switzerland). 2013. Т. 13, № 3. Pp. 3157–3168.
23. Кыонг, Н.С. Обоснование рациональных параметров электромеханической системы солнечных батарей с реактивно-вентильным электроприводом / Н.С. Кыонг. – 2013.

24. Кыонг, Н.С. Метод расчёта рационального шага позиционирования электромеханической системы солнечных батарей / Н.С. Кыонг // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Т. 12, № 2. – С. 22–26.

25. Сологубов, А.Ю. Перспективы использования систем экстремального регулирования ориентации гелиоустановок / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Электротехнические комплексы и системы: материалы международной научно-практической конференции. В 2 т. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ. 2017. – С. 221.

[К содержанию](#)