

УДК 681.58.62-83

ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. Г. Колпахчян, О. А. Кравченко, А. П. Микитинский,
Б. Н. Лобов, К. А. Микитинский

Изделия, изготавливаемые из композиционных материалов, находят широкое применение во многих отраслях промышленности благодаря своим уникальным физико-механическим характеристикам. Качественные характеристики будущих изделий во многом определяет работа электротехнической системы натяжения композиционного материала. В настоящее время в таких системах широко используются синхронные двигатели с постоянными магнитами, ферропорошковые муфты и тормоза. Появление достаточно дешевых, надежных и обладающих хорошими характеристиками вентильно-индукторных двигателей поставило вопрос о рассмотрении возможности их использования в намоточном оборудовании. Существенным недостатком данных двигателей являлось наличие больших пульсаций момента на валу. Вопросам снижения пульсаций момента за счет специального управления обмотками возбуждения двигателя посвящена обширная литература. В настоящей работе описан разработанный вентильно-индукторный двигатель, при проектировании которого стремились получить незначительные пульсации момента на валу. Проведенное исследование работы данного привода в электротехнических системах регулирования натяжения на модели показало, что данный двигатель можно рекомендовать к использованию в намоточном оборудовании.

Ключевые слова: *намотка изделий, композиционные материалы, вентильно-индукторный двигатель, привод натяжного устройства, пульсации момента на валу двигателя.*

К электрическим машинам, применяемым в электротехнических системах (ЭТС) регулирования натяжения станков по изготовлению изделий из композиционной ленты, предъявляется ряд требований. В процессе намотки момент может изменяться в широких пределах [1, 2]. Для точного управления усилием натяжения необходимо обеспечить регулирование электромагнитного момента приводной электрической машины с высокими показателями по точности и быстродействию, в том числе в режимах остановки или вращения с малой скоростью. Также, для получения изделий высокого качества необходимо минимизировать пульсации момента на валу устройства натяжения. В качестве привода устройства натяжения могут применяться электрические машины различных типов. Использование для этой цели асинхронного электродвигателя требует установки энкодера для обеспечения точного регулирования в стоповых и около-стоповых режимах работы. Применение электрических машин с постоянными магнитами на роторе для привода натяжных устройств также не позволяет использовать бездатчиковое управление. Это в значительной степени усложняет системы управления электроприводом и устройства натяжения ленты в целом.

В качестве альтернативы асинхронным и синхронным электрическим машинам с постоянными магнитами на роторе для решения описанной задачи возможно применение вентильно-индукторной электрической машины с независимым управлением по фазам. Она имеет простую конструкцию, поз-

воляет с высокой точностью регулировать электромагнитный момент во всем диапазоне регулирования скорости и простую конструкцию. Одним из существенных преимуществ электрических машин такого типа является возможность эффективного управления моментом во всем диапазоне регулирования скорости вращения, высокое быстродействие регулирования.

Разработке такого перспективного вентильно-индукторного двигателя и исследования возможности работы его в электротехнических системах натяжения посвящена настоящая статья.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) появились сравнительно недавно, в начале 1980-х годов. ВИД – это новый тип электромеханического преобразователя, объединяющего в себе свойства электрической машины и интегрированной системы регулирования [3 – 6].

У ВИД существуют ряд преимуществ по сравнению с обычными двигателями:

- отсутствуют постоянные магниты, усложняющие технологию производства и существенно повышающие цену всего электропривода;
- отсутствует операция заливки ротора, неизбежная при производстве асинхронных двигателей;
- обмотки (катушки) статора хорошо приспособлены к машинному производству;
- простая сборка двигателя;
- пропитка осуществляется только собственно катушек, а не статора в целом, как у других типов машин, что также снижает долю технологических затрат;

- возможность работы в агрессивных средах;
- низкий момент инерции;
- низкие потери в роторе;
- низкая себестоимость ВИД;
- высокая ремонтпригодность.

Несмотря на все достоинства ВИД, у него существуют также и недостатки, которые необходимо устранить при разработке такой машины:

- наличие пульсаций электромагнитного момента;
- высокий уровень шумов и вибрации;
- плохое использование стали.

Номенклатура маломощных тихоходных ВИД ограничена. Для электроприводов систем натяжения целесообразно использовать новый, вентильно-индукторный привод.

Для применения в составе устройства натяжения намоточного станка разработана вентильно-индукторная электрическая машина с электромагнитным моментом 12,5 Н·м и частотой вращения 1000 об/мин. Для сокращения пульсаций электромагнитного момента и улучшения возможностей регулирования было принято количество фаз, равное пяти, с одной парой полюсов. В этом случае на статоре расположены 10 зубцов, на роторе – 8 (конфигурация 10/8). Наружный диаметр магнитопровода статора $D_{1н}$ равен 120 мм, внутренний диаметр ротора $D_{2в} = 40$ мм. Главные размеры рассматриваемой электрической машины следующие: диаметр по зазору $D_{1в} = 67$ мм, активная длина $l_{\delta} = 100$ мм, величина воздушного зазора $\delta_B = 0,3$ мм. Эскиз активной части разработанной электрической машины представлен на рис. 1.

В результате оптимизационного расчета были получены следующие размеры активной части (см. рис. 1):

- количество зубцов на статоре/роторе 10/8;
- наружный диаметр статора $D_{1н} = 120$ мм;
- внутренний диаметр статора (диаметр по воздушному зазору) $D_{1в} = 67$ мм;
- воздушный зазор $\delta_B = 0,3$ мм;
- внутренний диаметр ротора $D_{2в} = 40$ мм;
- высота зубцов статора/ротора $h_{z1}/h_{z2} = 21/7,5$ мм;
- ширина зубцов статора/ротора $b_{z1}/b_{z2} = 9/7,5$ мм;
- длина магнитопровода по воздушному зазору $l_{\delta} = 100$ мм;
- высота/ширина обмотки $h_w/b_w = 19/6$ мм;
- количество витков в обмотках статора 210;
- максимальный ток обмотки статора $I_{фmax} = 6$ А;
- сопротивление фазы статора $R_{\phi} = 7$ Ом;
- угол наклона зубца статора $\alpha_{z2} = 10^\circ$.

Определение параметров рассматриваемой электрической машины для использования в модели системы намотки выполнялось с применением методов теории поля. Для этого с использованием программного комплекса FEMM (© David Meeker) [7] решалась задача магнитостатики в плоскопараллельной постановке. По результатам серии расчетов распределения магнитного поля в расчетной области определены зависимости потокосцепления фазы статора от тока при различных взаимных положениях статора и ротора. Результаты расчета распределения магнитной индукции при одном из положений ротора показаны на рис. 2.

На рис. 3 приведены зависимости потокосцепления фазы статора Ψ и создаваемого ей электромагнитного момента M от тока фазы I при различных углах поворота ротора γ относительно статора. Считается, что угол поворота равен нулю при согласованном положении зубцов статора и ротора.

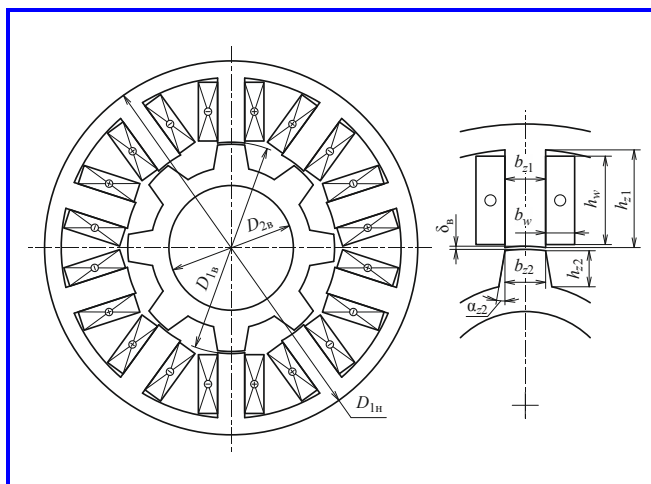


Рис. 1. Эскиз активной части вентильно-индукторной электрической машины для устройства натяжения намоточного станка

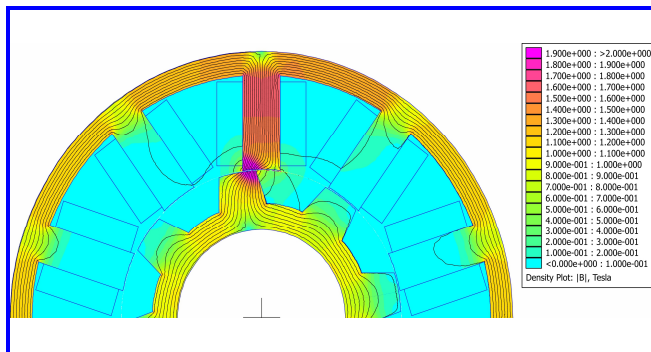


Рис. 2. Распределение магнитного поля в расчетной области вентильно-индукторной электрической машины

При моделировании процессов в вентильно-индукторной электрической машине используется допущение, что фазы не связаны между собой в магнитном отношении. Это позволяет рассматривать электромагнитные процессы в каждой фазе обособленно. В этом случае электромагнитный момент электрической машины получается суммированием моментов, создаваемых действием каждой из фаз. С учетом принятого допущения процессы в фазе статора описываются уравнением, составленным на основе уравнения электрического баланса:

$$\frac{di_{\phi}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{\phi}(i_{\phi}, \gamma)}(u_{\phi}(t) - E_{\phi}), \quad (1)$$

где u_{ϕ} , i_{ϕ} – напряжение и ток фазы статора;

$L_{\phi} = \frac{\partial \Psi_{\phi}(i_{\phi}, \gamma)}{\partial i}$ – дифференциальная индуктивность фазы статора; $\Psi_{\phi}(i_{\phi}, \gamma)$ – зависимость потокосцепления фазы статора от тока фазы и угла поворота ротора;

$E_{\phi} = i_{\phi} \omega \frac{\partial \Psi_{\phi}(i_{\phi}, \gamma)}{\partial \gamma}$ – электродвижущая сила

вращения фазы статора; $\omega = \frac{d\gamma}{dt}$ – угловая скорость вращения ротора.

С использованием уравнения (1) был выполнено моделирование электромагнитных процессов в описанной выше вентильно-индукторной электрической машине. К фазам статора прикладываются импульсы напряжения с амплитудой 311 В. Импульс напряжения подается на фазу при угле поворота ротора $17,0^{\circ}$, снимается при угле $41,5^{\circ}$. Полученные в результате моделирования значения напряжения U и тока фазы I и электромагнитного момента M приведены на рис. 4.

Для создания комплексной модели натяжного устройства станка для намотки в системе MATLAB-Simulink целесообразно использовать встроенную модель вентильно-индукторной электрической машины. Она описывается параметрами, показанными на рис. 5, а.

Для рассматриваемой электрической машины были определены следующие параметры встроенной модели:

$R_s = 7 \text{ Ом}$ – активное сопротивление фазы;

$J_m = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции;

$M_s = 0,0001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ – коэффициент сопротивления;

$L_q = 0,080247 \text{ Гн}$ – индуктивность в рассогласованном положении;

$L_d = 0,84848 \text{ Гн}$ – индуктивность в согласованном положении в ненасыщенном режиме;

$L_{q\text{sat}} = 0,0123519 \text{ Гн}$ – индуктивность в согласованном положении в насыщенном режиме;

$I_m = 9,5038 \text{ А}$ – максимальный ток фазы;
 $\Psi_m = 1,2212 \text{ Вб}$ – максимальное потокосцепление фазы в согласованном режиме.

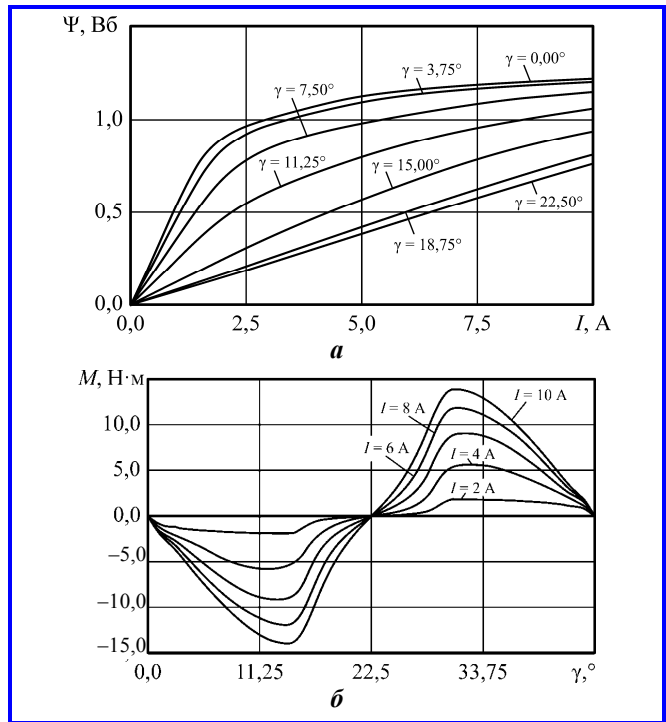


Рис. 3. Зависимости потокосцепления фазы статора Ψ от тока I (а) и создаваемого ей электромагнитного момента M при различных углах поворота ротора γ (б)

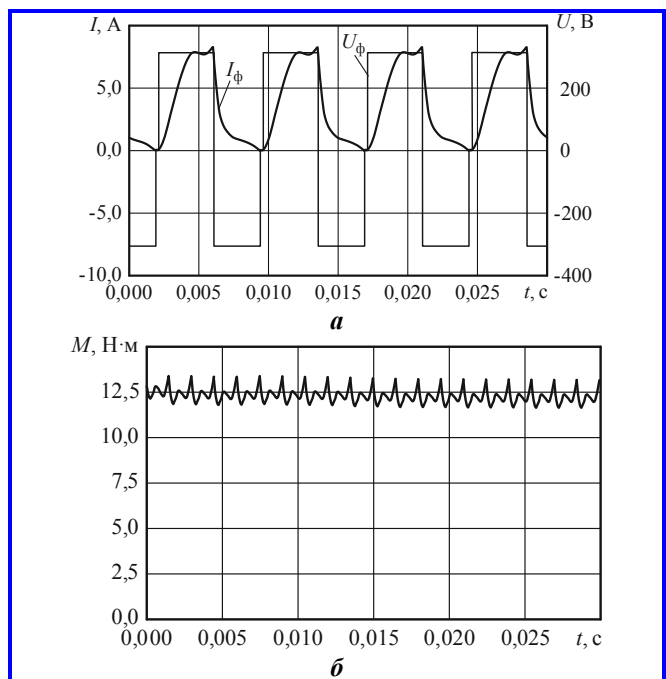


Рис. 4. Результаты моделирования электромагнитных процессов в вентильно-индукторной электрической машине: а – напряжения U и тока фазы I ; б – электромагнитного момента M

На рис. 5, б, показаны результаты аппроксимации зависимостей потокосцепления фазы Ψ от тока I для согласованного и рассогласованного положений зубцов статора и ротора. Сплошной линией показаны результаты аппроксимации зависимостей с использованием встроенной модели вентильно-индукторной электрической машины, точками – данные, полученные в результате полевых расчетов. Здесь Ψ_q и Ψ_d , соответственно, потокосцепление в согласованном и рассогласованном положениях. Можно отметить хорошее совпадение расчетных и аппроксимированных зависимостей.

На рис. 6 приведены результаты моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в вентильно-индукторной электрической машине, полученные с использованием системы MATLAB-Simulink. Был рассмотрен случай разгона электрической машины из неподвижного состояния до частоты вращения 800 об/мин. Показаны значения потокосцеплений Ψ (<Flux (V·s)>) (а) и токов I (<I (A)>) (б) фаз статора, электромагнитного момента M (<Te (N·m)>) (в), частоты вращения ω (speed) (г) и задания амплитуды импульса тока фазы I (I_{ref}) (д). Анализ полученных данных показывает, что регулирование происходит с высокими динамическими показателями, без перерегулирования и существенных колебаний момента.

Рассмотрим возможность использования разработанного двигателя в электротехнических системах регулирования натяжения «сухого» композиционного материала. Кинематическая схема намотки лонжерона приведена на рис. 7 [8].

«Сухая» лента 1 с натяжением S_0 попадает на обрешиненный ролик 2 радиусом r_1 . Ролик связан через редуктор 3 с вентильно-индукторным двигателем 4 . Далее композиционная лента с ролика 2 попадает на участок намотки длиной l_1 со скоростью v_1 . Натяжение ленты на участке намотки измеряется датчиком 5 . На участке намотки существуют направляющие ролики 6 . С натяжением S_1 и скоростью v_2 лента укладывается на изделие 7 . Изделие вращается электродвигателем 9 через редуктор 8 .

Структурная схема электротехнической системы регулирования приведена на рис. 8.

На рис. 8 введены обозначения: $W_{PS}(p)$, $W_{PC}(p)$, $W_{ВИД}(p)$ – передаточные функции регулятора натяжения, скорости и вентильно-индукторного двигателя соответственно; УЛ – упругая лента; η_1 – коэффициент полезного действия редуктора и двигателя; k_{OCS} , k_{OCC} – коэффициенты обратных связей по натяжению и скорости; r_1 – радиус тормозного ролика; i_1 – передаточное отношение редуктора.

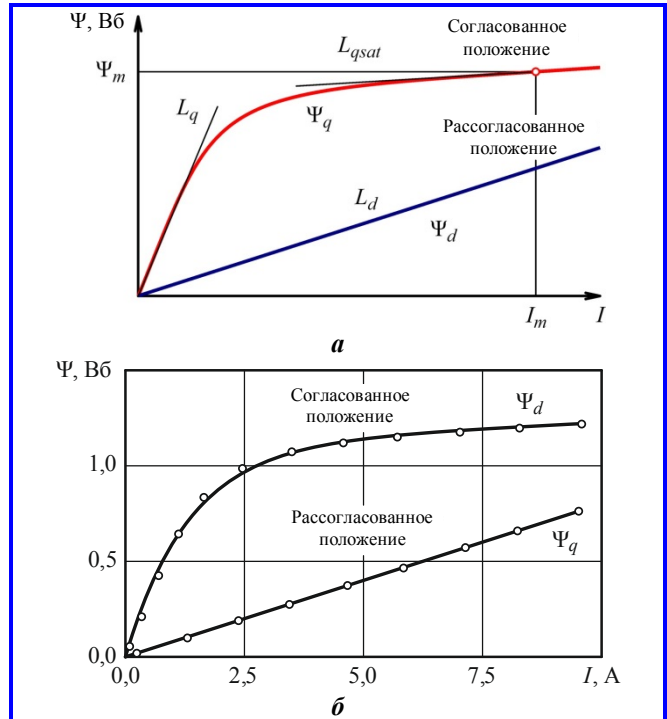


Рис. 5. Параметры модели вентильно-индукторной электрической машины в MATLAB-Simulink (а); аппроксимация зависимостей потокосцепления рассматриваемой электрической машины (б)

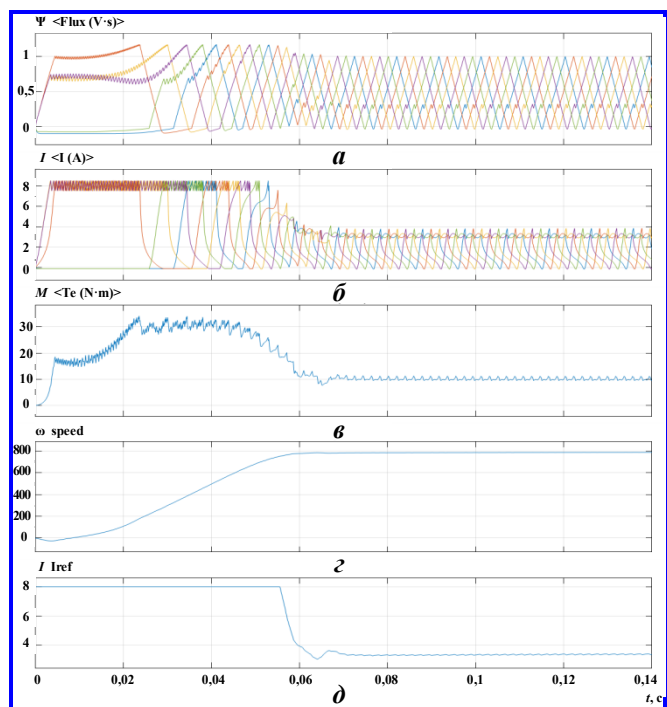


Рис. 6. Результаты моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в вентильно-индукторной электрической машине в системе MATLAB-Simulink: потокосцеплений Ψ (а) и токов I (б) фаз статора, электромагнитного момента M (в), частоты вращения ω (г) и задания амплитуды импульса тока фазы I (д)

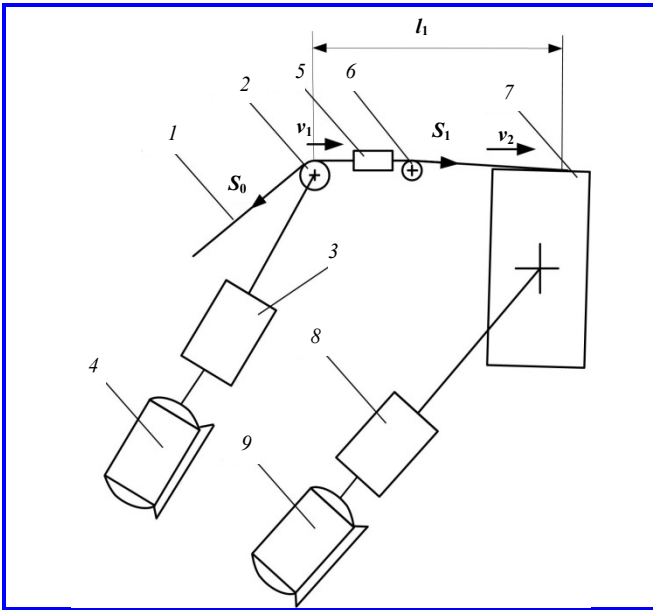


Рис. 7. Кинематическая схема намотки лонжеронов из «сухого» композиционного материала

На рис. 9 приведена схема набора ЭТС натяжения с вентильно-индукторным двигателем в системе MATLAB-Simulink.

В качестве регуляторов скорости и натяжения используются пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы). Так как контур натяжения настроен на симметричный оптимум, перед ним установлено апериодическое звено. Вопросы математического описания упругой «сухой» ленты и намотки ее на изделие типа «лонжерон» подробно изучены в [8, 9] и здесь не рассматриваются. В качестве модели вентильно-индукторного двигателя и системы его управления использована стандартная модель из пакета MATLAB-Simulink, приведенная на рис. 10.

В исходные данные модели внесены параметры рассчитанного двигателя. При моделировании – $r_1 = 0,08$ м; $i_1 = 6$; $\eta_1 = 0,8$; $l_1 = 1,5$ м; скорость вращения изделия 1 рад/с; габаритные размеры изделия $1,6 \times 0,8$ м.

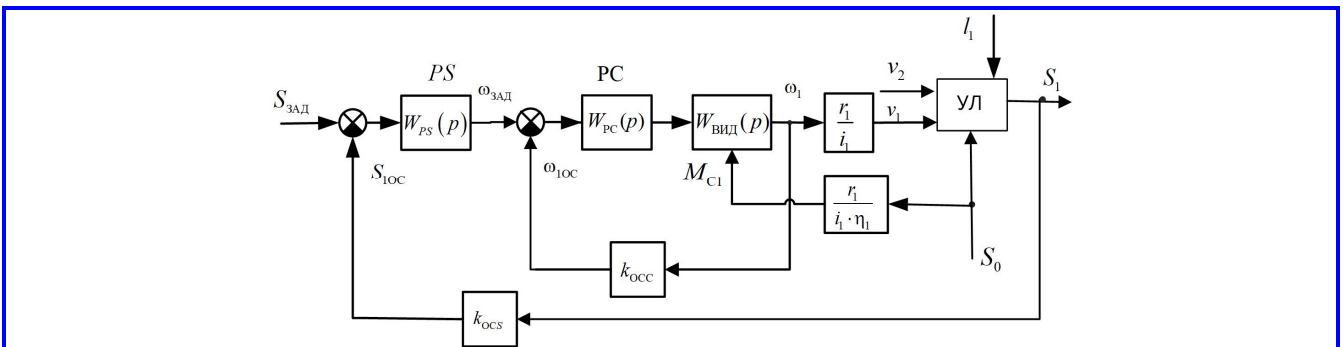


Рис. 8. Структурная схема электротехнической системы регулирования

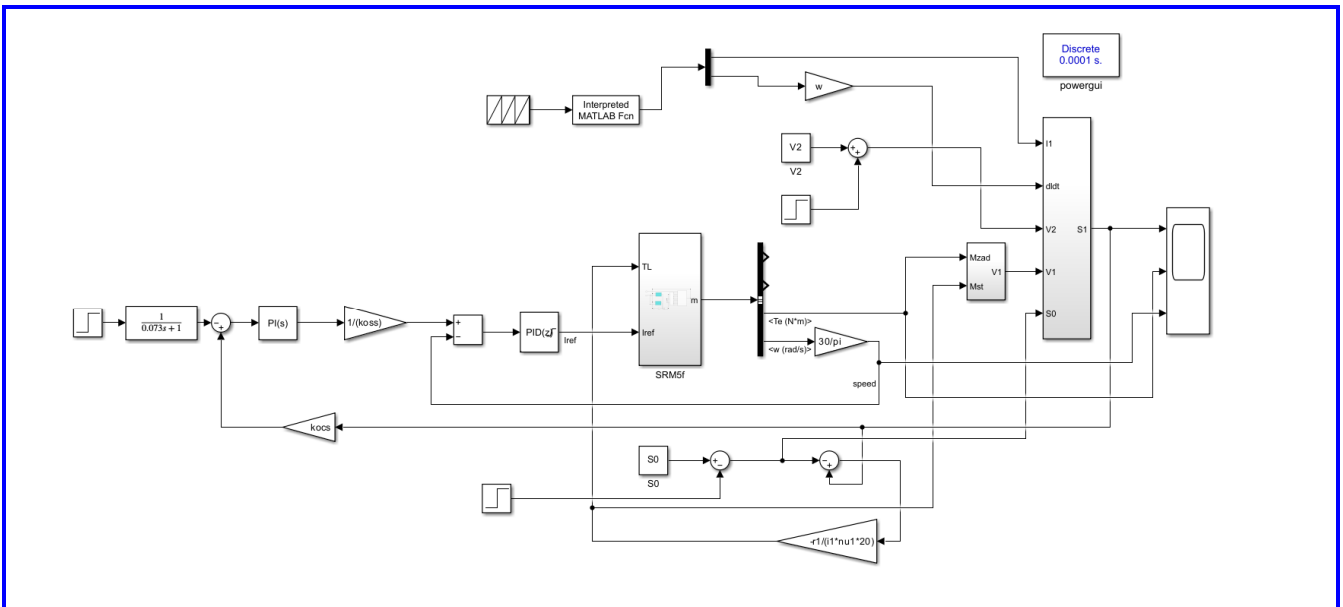


Рис. 9. Схема набора электротехнической системы натяжения с вентильно-индукторным двигателем в системе MATLAB-Simulink

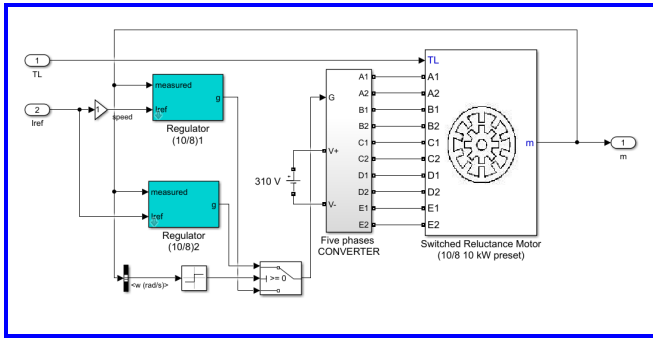


Рис. 10. Схема набора вентильно-индукторного двигателя и системы его управления в пакете MATLAB-Simulink

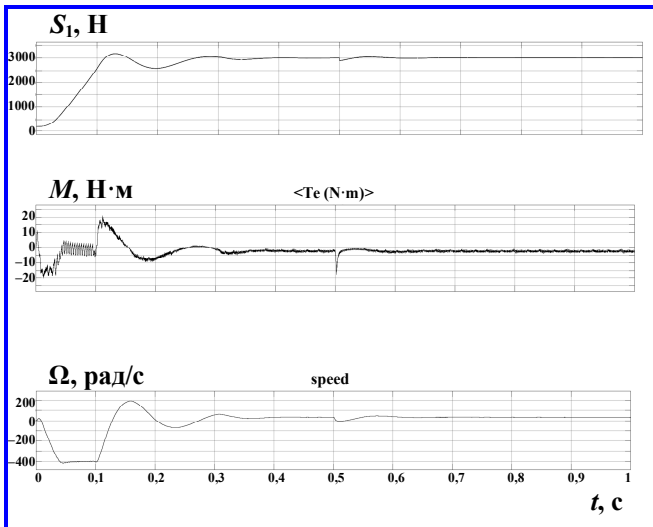


Рис. 11. Результаты моделирования работы электротехнических систем натяжения с вентильно-индукторным двигателем

В момент времени 0,5 с натяжение S_0 изменяется с 100 до 200 Н. Результаты моделирования представлены на рис. 11.

Анализ результатов моделирования показал, что:

- перерегулирование натяжения при пуске намоточного станка составило 6%;
- время переходного процесса 0,24 с;
- пульсации момента на валу двигателя не влияют на натяжение композиционного материала;
- при приложении возмущающего воздействия в виде изменения предварительного натяжения на 100 Н натяжение изменяется на это же значение, но через 0,08 с стабилизируется на прежнем уровне.

Заключение

В работе предлагается новый подход к построению электротехнической системы регулирования

Поступила в редакцию 03.10.2024

натяжения «сухого» композиционного материала при использовании разработанного нового вентильно-индукторного двигателя. Показана целесообразность использования данного двигателя в натяжном устройстве станка для намотки изделий сложной геометрической формы.

Литература

1. Антипов, Ю. В. Полимерные композиционные материалы. Технологии и применение / Ю. В. Антипов, А. А. Кульков, Н. В. Пименов // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2016. – Т. 58. – № 1. – С. 29–41.
2. Технологические факторы и их влияние на качество изделий из композитов, изготавливаемых методом намотки / Ю. В. Василевич, К. А. Горельий, С. В. Сахоненко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – Т. 4. – 2015. – С. 194–196.
3. Сравнение энергетических характеристик вентильно-индукторного и асинхронного электроприводов мощностью 15 кВт / С. А. Пахомин, Д. В. Крайнов, Ф. А. Реднов [и др.] // Электричество. – 2017. – № 1. – С. 44–47.
4. Кузнецов, В. А. Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2011. – 71 с.
5. Kolpakhchyan, P. Sensorless control of the high-speed switched-reluctance generator for the steam turbine / P. G. Kolpakhchyan, A. R. Shaikhiyev, A. E. Kochin // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 680. – P. 349–358.
6. Torrey, D. Switched reluctance generators and their control / D. A. Torrey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49. – No. 1. – P. 3–14.
7. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual / D. Meeker. – 2024. – URL : <http://www.femm.info/wiki/Files/files.xml?action=download&file=manual.pdf>.
8. Математическое описание упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения типа прямоугольник / Д. Ю. Богданов, К. А. Микитинский, Д. Г. Борзенко [и др.] // Микропроцессорные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и стат. Всероссийской научной школы, г. Новочеркасск, 5–7 сентября 2011 г. ; Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). – Новочеркасск : Лик, 2011. – С. 138–141.
9. Богданов, Д. Ю. Математическое описание упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения типа прямоугольник / Д. Ю. Богданов, Д. В. Чередникова, А. П. Микитинский // Микропроцессорные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и стат. Всероссийской научной школы, г. Новочеркасск, 5–7 сентября 2011 г. ; Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). – Новочеркасск : Лик, 2011. – С. 141–143.

*Павел Григорьевич Колпахчян, доктор технических наук, профессор,
т. 8 (812) 457-85-36, e-mail: kolpakhchyan@pgups.ru.
(Петербургский государственный университет путей сообщения).*

- Олег Александрович Кравченко**, доктор технических наук, ректор, т. 8 (487) 235-21-55, e-mail: kravchenko@tsu.tula.ru.
(Тульский государственный университет).
- Александр Петрович Микитинский**, кандидат технических наук, доцент, т. +7 (903) 436-44-46, e-mail: mialexp@mail.ru.
(Южно-российский государственный политехнический университет (НПИ)).
(Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) ДГТУ в г. Шахты).
- Борис Николаевич Лобов**, доктор технических наук, профессор, т. +7 (928) 138-60-92, e-mail: blobov@yandex.ru.
Константин Александрович Микитинский, аспирант, т. +7 (989) 624-10-02, e-mail: kostyam.24@yandex.com.
(Южно-российский государственный политехнический университет (НПИ)).

VALVE-INDUCTOR MOTOR FOR ELECTROTECHNICAL TENSION CONTROL SYSTEM OF COMPOSITE MATERIALS

P. G. Kolpakhchyan, O. A. Kravchenko, A. P. Mikitinsky,
B. N. Lobov, K. A. Mikitinsky

Products made of composite materials are widely used in many industries due to their unique physical and mechanical characteristics. The qualitative characteristics of future products are largely determined by the operation of the electrical tension system of the composite material. Currently, synchronous motors with permanent magnets, ferro-powder clutches and brakes are widely used in such systems. The appearance of fairly cheap, reliable and well-characterized valve-inductor motors has raised the question of considering the possibility of their use in winding equipment. A significant disadvantage of these engines was the presence of large moment pulsations on the shaft. Extensive literature is devoted to the issues of reducing torque pulsations due to special control of the motor excitation windings. In this paper, a developed valve-inductor motor is described, in the design of which they sought to obtain insignificant moment pulsations on the shaft. The conducted study of the operation of this drive in electrical tension control systems on the model showed that this engine can be recommended for use in winding equipment.

Keywords: product winding, composite materials, valve-inductor motor, tensioner drive, torque pulsations on the motor shaft.

References

1. Antipov, Yu. V. Polymer composite materials. Technologies and application / Yu. V. Antipov, A. A. Kulyeov, N. V. Pimenov // High-molecular compounds. Series C. – 2016. – Vol. 58. – No. 1. – P. 29–41.
2. Technological factors and their influence on the quality of products made of composites manufactured by the winding method / Yu. V. Vasilevich, K. A. Gorely, S. V. Sakhonenko [et al.] // Current issues in mechanical engineering. – 2015. – Vol. 4. – P. 194–196.
3. Comparison of energy characteristics of switched reluctance and asynchronous electric drives with a power of 15 kW / S. A. Pakhomin, D. V. Krainov, F. A. Rednov [et al.] // Electricity. – 2017. – No. 1. – P. 44–47.
4. Kuznetsov, V. A. Switched reluctance motors / V. A. Kuznetsov, V. A. Kuzmichev. – Moscow : Publishing House, Moscow Power Engineering Institute, 2011. – 71 p.
5. Kolpakhchyan, P. Sensorless control of the high-speed switched-reluctance generator for the steam turbine / P. G. Kolpakhchyan, A. R. Shaikhiev, A. E. Kochin // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 680. – P. 349–358.
6. Torrey, D. Switched reluctance generators and their control / D. A. Torrey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49. – No. 1. – P. 3–14.
7. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual / D. Meeker. – 2024. – URL : <http://www.femm.info/wiki/Files/files.xml?action=download&file=manual.pdf>.
8. Mathematical description of an elastic tape as a control object when winding bodies of rotation of the rectangle type / D. Yu. Bogdanov, K. A. Mikitinsky, D. G. Borzenko [et al.] // Microprocessor information and control systems and complexes: collection of articles. abstract and stat. All-Russian Scientific School, Novocherkassk, September 5–7, 2011 ; South Russian State Technical University (NPI). – Novocherkassk : Lik, 2011. – P. 138–141.
9. Bogdanov, D. Yu. Mathematical description of an elastic tape as a control object when winding bodies of rotation of the rectangle type / D. Yu. Bogdanov, D. V. Cherednikova, A. P. Mikitinsky // Microprocessor information-control systems and complexes: collection. abstract and stat. All-Russian Scientific School, Novocherkassk, September 5–7, 2011 ; South Russian State Technical University (NPI). – Novocherkassk : Lik, 2011. – P. 141–143.

Pavel Grigoryevich Kolpakhchyan, doctor of technical sciences, professor, t. 8 (812) 457-85-36, e-mail: kolpakhchyan@pgups.ru.
(St. Petersburg State University of Railway Engineering).

Oleg Alexandrovich Kravchenko, doctor of technical sciences, rector, t. 8 (487) 235-21-55, e-mail: kravchenko@tsu.tula.ru.
(Tula State University).

Alexander Petrovich Mikitinsky, candidate of technical sciences, associate professor, t. +7 (903) 436-44-46, e-mail: mialexp@mail.ru.
(Yuzhno-Russian State Polytechnic University (NPI)).
(Institute of Service and Entrepreneurship (branch) DSTU in Shakhty).

Boris Nikolaevich Lobov, doctor of technical sciences, professor, t. +7 (928) 138-60-92, e-mail: blobov@yandex.ru.
Konstantin Alexandrovich Mikitinsky, postgraduate student, t. +7 (989) 624-10-02, e-mail: kostyam.24@yandex.com.
(Yuzhno-Russian State Polytechnic University (NPI)).