

**Н.Н. ЗАБЛОДСКИЙ**, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, ДонГТУ, Алчевск

**В.Е. ПЛЮГИН**, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск

**В.В. СКРЫЛЬ**, аспирант, ДонГТУ, Алчевск

## **ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВУХМОДУЛЬНОГО ЭМПЭ С МАССИВНЫМ РОТОРОМ**

Рассмотрены особенности моделирования и проектирования машин с массивными роторами, проблемы создания двухмодульных конструкций ЭМПЭ, взаимного влияния полей различного рода и вопрос необходимости получения механических характеристик рабочей нагрузочно-охлаждающей среды.

**Ключевые слова:** моделирование, проектирование, двухмодульная конструкция, механические характеристики.

**Введение.** Активное развитие техники и технологий, начавшееся в XIX веке, продолжается и сегодня еще более активно. Энергосберегающие технологии и машины, имеющие повышенный КПД выходят на первый план. Создание энергосберегающих технологий имеет следующие главные направления:

- повышение КПД отдельных элементов системы преобразования энергии;
- повышение удельной мощности;
- создание многофункциональных устройств, в которых энергия системы практически полностью используется.

Для технологических систем, объединяющих процессы транспортировки, нагрева, перемешивания материалов, наиболее перспективен последний вариант.

Таким образом, объединением нескольких отдельных технологических процессов, соответственно с отдельными исполнительными органами, где большое количество энергии рассеивалось в виде тепла, был разработан единый полифункциональный ЭПМЭ (ПЭМП), где все технологические процессы выполняются в одном устройстве, а выделяемая тепловая энергия используется для обработки материала.

**Цель и задачи исследований.** Целью настоящей работы является проведения анализа особенностей конструктивного исполнения ПЭМП с массивным ротором, а также проблем, возникающих при моделировании и проектировании двухмодульной машины. Поставленные задачи являются приоритетным направлением будущих исследований.

© Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Скрыль В.В., 2013

**Конструктивные и функциональные особенности.** В ПЭМП необходимо было выполнить несколько условий, для того чтобы обеспечить качественную обработку материала. Два из них, медленная скорость перемещения, ниже, чем у большинства машин, и повышенный нагрев, были выполнены нестандартным способом: разработан агрегат, имеющий модульную конструкцию из двигательных и тормозных модулей с внешним полым ротором-шнеком [1].

ПЭМП в отличие от традиционной асинхронной машин с массивным ротором имеет заметные отличия:

- внешний ротор выполнен из тонкостенного цилиндра, в котором глубина проникновения магнитного поля имеет тот же порядок, что толщина стенки;

- ротор является непосредственно исполнительным органом и не имеет выходного конца вала;

- температура стального ротора может достигать  $400^{\circ}\text{C}$ , что значительно влияет на его электрические и магнитные параметры; кроме того, из-за непосредственного контакта с рабочей нагрузочно-охлаждающей средой, расположенной неравномерно, значения этих параметров в разных частях ротора также сильно отличается;

- ПЭМП вследствие модульной конструкции с двигательным и тормозным модулями работающим в противовключении для получения низких частот вращения имеет разную глубину проникновения магнитного поля по оси ротора;

- наличие двигательного и тормозного статорных модулей с общим внешним полым ферромагнитным ротором усложняют как динамическое моделирование, так и решение задач их совместного проектирования. Значения скольжения необходимо определять в соответствии с выражением

$$S_T = \frac{p_T}{p_D} (1 - s_D) \pm 1, \quad (1)$$

где  $p_D, p_T$  – число пар полюсов соответственно ДМ и ТМ.

Знак "+" соответствует встречному, а "-" – согласному вращению магнитных полей ДМ и ТМ.

При подключении обмотки ДМ к трехфазной первичной сети с частотой  $f$ , образуется вращающееся  $2p_D$  – полюсное поле  $\Phi_D$ , под действием которого в массивном роторе протекают вихревые токи, создается асинхронный момент и ротор вращается с частотой  $n_p = n_1 (1 - s_D)$ , где  $n_1 = 60 f_1 / p_D$  и  $s_D$  – скольжение ДМ. Частота токов в роторе  $-f_{2D} = f_1 s_D$ .

При подключении к первичной сети статорной обмотки ТМ образуется  $2p_T$  – полюсное поле  $\Phi_T$ , которое наводит в массивном роторе ЭДС с частотой

$$f_{2T} = \frac{p_T}{60} (n_p \pm n_T) = \left[ \frac{p_T}{p_D} (1 - s_D) \pm 1 \right] f_1 = s_T \cdot f_1. \quad (2)$$

Скольжение  $s_T$  ТМ определяется выражением (1). Знак "+" в (1) и (2) соответствует встречному, а "-" – согласному вращению полей  $\Phi_D$  и  $\Phi_T$ .

Основное поле ЭТМП дополняется высшими гармониками  $n_1$  и таким образом формируется спектр полей в пространстве, где концентрируется в основном энергия магнитного поля ЭТМП, а именно – в воздушном зазоре.

**Проблемы и задачи проектирования.** При проектировании и моделировании ПЭМП приходится решать качественно новые задачи:

– при создании математической модели ПЭМП встает вопрос учета взаимного влияния различного рода полей, как то теплового и электромагнитного. Создание математических моделей с учетом одновременно происходящих и взаимосвязанных электромагнитных, тепловых, механических и других процессов, весьма затруднительно по многим причинам [2], но в условиях, когда устройство является приводом, нагревателем, исполнительным органом, является фактически необходимостью.

– другим важным моментом в моделировании и проектирование ПЭМП является его нестандартное взаимодействие с нагрузкой, а именно рабочей нагрузочно-охлаждающей средой, роль которой в нашем случае выполняет сыпучий материал.

– моделирование влияния сыпучего материала, в зависимости от его собственных параметров (плотность, влажность, параметры внутреннего трения среды), на тепловое поле ПЭМП, а также создание условной механической характеристики нагрузки – дополнительные задачи моделирования ПЭМП.

В связи с этим можно выделить ряд направлений в решение проблем проектирования.

Исходя из назначения ПЭМП, очевидно, что необходимо выполнить предварительный расчет рабочей нагрузочно-охлаждающей среды:

– определить мощность необходимую для нагрева и сушки материала, которая будет зависеть от производственной мощности комплекса, входной и требуемой влажностью материала;

– рассчитать механическую мощность необходимую на перемешивание и транспортировку, исходя из количества сырья находящегося в ПЭМП в процессе работы и его механических свойств.

Определение механической мощности целесообразно делать на основе модели поведения сыпучего материала на шнеке на подобие гидродинамических моделей вязких сред.

Следующим этапом проектирования должно стать формирование проектной (номинальной) мощности. Фактическая электромагнитная мощность, передаваемая ротору, преобразуется в полезную механическую и тепловую с некоторыми добавочными потерями (рис. 1).

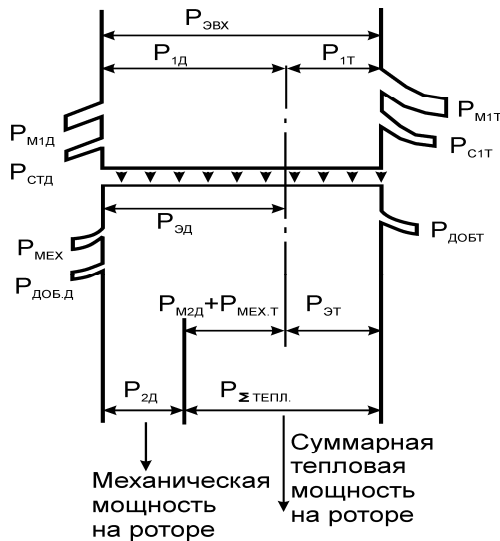


Рис. 1 – Энергетическая диаграмма преобразования активной мощности.

Особенности конструкции ротора, как исполнительного механизма, накладывает свой отпечаток на проектирование. Если размеры проводящего тела неограниченно большие, то электромагнитная волна затухает по закону  $A = A_m \cdot e^{-z/\Delta}$ , где  $A$  и  $A_m$  – текущее и максимальное значения составляющей поля;  $z$  – координата распространения электромагнитной волны;  $\Delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu_a s}$  – эквивалентная глубина проникновения поля. То есть при  $z = \Delta$ ,  $A = 0,37 A_m$  [3]. Но из-за выполнения ротора в виде тонкостенного цилиндра характер распростра-

нения поля отличается: составляющие поля в материале ротора претерпевают многократные отражения от поверхностей и постепенно затухают. Наличие отраженной волны электромагнитного поля вызывает в полном роторе значительное увеличение реактивной мощности и уменьшение коэффициента мощности двигателя в целом [3].

Расчет цепи ротора можно производить с использованием схем замещения [4] в комбинации с решением дифференциальных уравнений. В [5] на основе модели обобщенной электрической машины, являющейся базовой для всех машин рода цилиндрических была получена математическая модель асинхронного двигателя с массивным ротором. Дальнейшая адаптация модели условиям задачи для полого ротора и двухмодульной системы и использование ее в системе автоматизированного проектирования должна обеспечить высокое качество расчета ПЭМП.

Одно из главных направлений энергосбережения в электроприводе – использование систем питания и регулирования скорости. Так как наше устройство исходно является электрической машиной, то сказанное применимо и к нему. При этом в практику входит учет использования системы питания и регулирования на стадии проектирования.

По завершению процесса проектирования целесообразно выполнить оптимизацию параметров ПЭМП. Программу оптимизации можно включить в систему автоматизированного проектирования. Целевой функцией может служить интегральный показатель эффективности устройства включающий стоимость производства, стоимость эксплуатации, удельную производственную мощность и т.д.

Необходимая производительность комплекса накладывает некоторые ограничения на диаметр и длину ротора, шаг и высоту винта шнека, угол наклона винта и т.д., но не в абсолютных величинах, а в виде взаимозависимости. Поэтому в процесс оптимизации нужно включать и исполнительный орган, шнек, где эти параметры будут варьироваться.

**Проблемы и задачи моделирования.** К проблемам моделирования относятся:

- модель двухмодульной системы;
- определение установившейся частоты вращения;
- регулирование (поддержание) скорости вращения при переменной нагрузке.

Прототип модели двухмодульной системы для исследования работы был показан и реализована в системе MatLab Simulink в [6], где основой была математическая модель на базе обобщенной электриче-

ской машины [5]. Однако в указанной модели не учтены особенности распределения электромагнитного поля в ПЭМП обусловленные его конструкцией, а именно взаимопроникновения полей двигательного и тормозного модулей через общий ферромагнитный ротор и вал. Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование предложенной модели и определение картины поля в динамических режимах.

Определение установившейся частоты вращения при разной степени загрузки материала и разных его входных характеристиках важно ввиду необходимости определения степени его обработки и оценки выходных характеристик, так как они могут быть нестабильными, что недопустимо. В связи с этим возникает необходимость регулирования или просто поддержания скорости вращения при переменной нагрузке.

Регулирование и поддержание скорости при изменении нагрузки и параметров РНОС, а также безопасный пуск шнека при его предварительной загрузке или заштыбовке может обеспечить система частотного управления.

Для удешевления ПЭМП желательно использовать один частотный преобразователь для питания всех модулей, поэтому необходимо оценить тепловую и механическую мощность агрегата в таком режиме работы.

Конечным результатом работы над описанными выше проблемами должно стать создание многофакторной модели ПЭМП для исследования динамических режимов и полной математической модели в приложении для проектирования ПЭМП с автоматической программной оптимизацией конструкции.

### **Выводы.**

1. Определены проблемы в проектировании полифункциональных электромеханических преобразователей с внешним массивным ротором и задачи дальнейших исследований.

2. Проанализированы существующие работы по созданию теоретической базы машин с массивными, полыми роторами и решению проблем создания эффективных ПЭМП.

3. Предложены пути решения некоторых поставленных задач: изменение некоторых существующих подходов в проектировании и усовершенствование моделей устройства и процессов в нем; создание новых полнофакторных моделей; использование оптимизации устройств по многим параметрам при проектировании.

4. Результаты исследований, изложенных в настоящей работе, могут использоваться для дальнейшего определения действий в развитии теории и моделировании ЭМПЭ, а также непосредственно при проек-

тировании и оптимизации многомодульных ПЭМП с внешним ферромагнитным ротором.

**Список литературы:** 1. Пат. 5042 України, МКІ 7 F26B17/18. Шнековый сушильный аппарат / М.М. Заблодський, В.М. Дорофеев, В.Ф. Шинкаренко та інші. – № 2001128244; Заявл. 03.12.2001; Опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1. – 4 с. 2. Проблемы моделирования переходных электромагнитных процессов в асинхронных машинах / В.П.Вербовой, П.Ф.Вербовой // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки", частина 2. – 2004. – С. 65-70. 3. Могильников В.С. Асинхронные электродвигатели с двухслойным ротором и их применение / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 203 с. 4. Куцевалов В.И. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 302 с. 5. Mathematical model of the induction motor with ferromagnetic rotor / N. Zabłodskij, V. Pliugin, J. Lettl, S. Fligl, V. Skryl. – Slovakia, "Slovak Univ Technology", 2013. – 11 p. 6. Dynamic Simulation of the Double-Stator Induction Electromechanical Converter with Ferromagnetic Rotor / N. Zabłodskij, V. Pliugin, J. Lettl, S. Fligl. – Istanbul, "Power Engineering", 2013. – 13 p.

*Поступила в редколлегию 19.09.2013*



**Заблодский Николай Николаевич**, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера в Коммунарском горно-металлургическом институте в 1973 г. Диссертацию кандидата технических наук по специальности электрические машины и аппараты защитил в 1991 г в Московском горном институте. В 2008 г защитил диссертацию доктора технических наук в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт". Заведующий кафедрой "Электрические машины и аппараты" Донбасского государственного технического университета. С 2005 г занимает должность проректора по научной работе Донбасского государственного технического университета.

Научные интересы связаны с исследованиями полифункциональных электротепломеханических преобразователей энергии для энергосберегающих технологий.



**Плюгин Владислав Евгеньевич**, доцент, кандидат технических наук. Диплом инженера защитил в Донбасском горно-металлургическом институте в 2000 г. В 2004 г защитил диссертацию кандидата технических наук в Донецком национальном техническом университете по специальности электрические машины и аппараты.

Научные интересы связаны с объектно-ориентированным проектированием полифункциональных электротепломеханических преобразователей энергии. В настоящий момент состоит в докторантуре ДонГТУ, научный консультант Заблодский Н.Н.



**Скрыль Вячеслав Владимирович**, аспирант. Защитил диплом магистра в Донбасском государственном техническом университете в 2012 г.

Научные интересы связаны с объектно-ориентированным программированием, энергоэффективным взаимоинтегрированием технологий. В настоящий момент состоит в аспирантуре ДонГТУ, научный руководитель Плюгин В. Е.

### **УДК 621.313**

**Проблемы моделирования и проектирования двухмодульного ЭМПЭ с массивным ротором / Заблудский Н.Н., Плюгин В.Е., Скрыль В.В.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 51 (1024). – С. 20-27. Бібліогр.: 6 назв.

Розглянуті особливості моделювання і проектування машин з масивними роторами, проблеми створення двохмодульних конструкцій ЕМПЕ, взаємного впливу полів різного роду і питання необхідності отримання механічні характеристики робочого навантажувально-охолоджуючого середовища.

**Ключові слова:** моделювання, проектування, двохмодульна конструкція, механічні характеристики.

The features of modeling and designing machines with solid rotors, problem of creating two-module designs of the EMPE, reciprocal influence of various fields and problems the need to obtain the mechanical characteristics of the load-working coolant are considered.

**Keywords:** modeling, designing, two-module construction, mechanical properties.