

Компьютерное моделирование магнитных систем вентильно-индукторных двигателей

С.Ф. МАСЛОВИЧ, Т.С. КОРОЛЁНОК, В.Н. ГАЛУШКО, А.В. ЖЕЛЕЗНИЧЕНКО

Предлагаются основные аспекты использования программ расчета магнитных систем для моделирования и расчета характеристик вентильно-индукторных двигателей и генераторов. Представлен анализ предыдущих исследований вентильно-индукторных двигателей, определены их недостатки. Предложен новый подход для моделирования характеристик вентильно-индукторных двигателей, их конструкции, применяемых материалов, значений напряжения и токов фаз и получения предполагаемых результатов.

Ключевые слова: моделирование, математическая модель, вентильно-индукторный двигатель, вентильно-индукторный генератор, магнитная цепь, фаза двигателя

Major aspects of programs for calculation of magnetic systems of simulation and characteristics of switched-inductor motors and generators are offered. The analysis of the previous studies of switched-reluctance motors is presented, their shortcomings are identified. A new approach for modeling the behavior of switched-reluctance motors, their design, the materials used, voltages and phase currents and achieving intended results are presented.

Keywords: modeling, mathematical model, switched-reluctance motor, switched-inductor generator magnetic circuit motor phase

Введение. Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) и генераторы (ВИГ) превосходят существующие на сегодняшний день двигатели других типов по ряду ключевых характеристик. Например, применяемые вентильно-индукторные двигатели и генераторы на транспортных средствах отличаются высокой надежностью, простотой конструкции, повышенным КПД и массогабаритными показателями, технологичностью изготовления, более низкой стоимостью в серийном производстве. К недостаткам ВИД обычно относят невозможность работать без полупроводникового преобразователя, наличие пульсаций электромагнитного момента и, как следствие, повышенный шум и вибрация, а также более высокая стоимость полупроводникового преобразователя в электроприводе эквивалентной выходной мощности. [1], [2]. Такие конструктивные особенности вентильных индукторных машин как отсутствие щеток делают их незаменимыми источниками постоянного тока в автотракторной технике, комбайнах, различных сельхозмашинах, технике специального военного назначения. Поэтому создание математической модели при разработке ВИГ и ВИД, позволяющей учитывать главные размеры и соотношения геометрических параметров зубцовой зоны в целях улучшения массогабаритных, энергетических и динамических показателей является актуальной задачей.

Эффективная работа двигателя зависит от индукции, энергопотребления, массы, конфигурации и конструктивных особенностей элементов, формирующих магнитное поле. Поэтому при разработке перспективных магнитных систем с целью снижения затрат и времени на экспериментальную отработку изделия рекомендуется использовать численное моделирование, позволяющее достаточно полно охарактеризовать параметры и конфигурацию магнитного поля, создаваемого системой. Результат предварительного расчета – определение величины ампер-витков, массы, энергопотребления, индукции в воздушном зазоре и в элементах конструкции; решение задачи охлаждения на основании известных параметров теплопроводности и геометрии ВИГ и ВИД.

В настоящее время разработаны и применяются пакеты прикладных программ (*ELCUT*, *FEMM*, *NISA*) [3], позволяющие рассчитывать параметры и топологию магнитного поля с учетом насыщения стали магнитопровода. Расчеты распределения магнитного поля всех программ

основаны на методе конечных элементов исходных дифференциальных уравнений поля, решаемых итерационным методом Ньютона-Рафсона. Исследование делится на три основных этапа: формирование исходных данных, решение задачи моделирования, верификация моделей и сравнение результатов моделирования с характеристиками реальных ВИГ и ВИД. В этап подготовки исходных данных входит построение геометрии модели, дискретизация области моделирования на выбранные типы конечных элементов, задание свойств материалов. Перед решением задачи моделирования задаются области с токовыми нагрузками (определяется плотность тока) и граничные условия. Результаты программ моделирования представляются в геометрическом распределении магнитной индукции, напряженности, векторного потенциала, топологии, индуктивности магнитного поля и так далее. После компьютерного расчета проводилась верификация полученных моделей с помощью изменения влияющих факторов и проверка адекватности модели, то есть статистическая обработка результатов моделирования и сравнение с экспериментальными данными; при расхождении результатов в модель вводились поправки и уточнения с учетом причин отклонения.

Помимо создания достоверных моделей магнитной системы, решались следующие задачи:

- создание моделей, которые могут быть использованы для изучения процессов, протекающих в ВИД при различных конфигурациях их фазных обмоток и коммутации токов в них, с учётом взаимодействия сцепленных с ними магнитных потоков;
- разработка методики аналитического расчета магнитной проводимости воздушного зазора вентильных индукторных машин в функции угла поворота ротора;
- разработка математической модели, функционально связывающей параметры вентильных индукторных электромеханических систем с их характеристиками;
- исследование влияния изменения отдельных параметров электрической машины на энергетические и динамические характеристики ВИД с целью получения практических рекомендаций, необходимых для их рационального проектирования;
- верификация и апробация результатов моделирования, подтверждающих достоверность результатов теоретических исследований.

Анализ предыдущих исследований. Важными особенностями ВИД являются дискретность работы фаз, наличие датчика положения ротора, по сигналам которого осуществляется коммутация фаз. Эти схемотехнические отличия должны учитываться при исследовании статических и динамических характеристик. В процессе вращения ротора ИМ происходит непрерывное изменение величины воздушного зазора между статором и ротором в каждой её фазе. Данное изменение влечёт за собой изменение магнитной проводимости (магнитного сопротивления) участка магнитной цепи, в которой замыкается магнитный поток, сцепленный с фазой.

Электромагнитные и электрические переходные и установившиеся процессы в ВИД описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Структура уравнений определяется числом фаз двигателя, режимом работы вентильного коммутатора. Индуктивности обмоток зависят от текущего положения ротора и значения тока, протекающего в обмотке [4].

Существующие наработки по математическому описанию ВИД можно классифицировать по трем основным видам:

1. В системе координат, привязанной к фазам ВИД, с учетом зависимости индуктивностей фаз от положения ротора.

В этом случае [5] математическое описание процессов в ВИД представляется в виде трех подсистем уравнений, каждая из которых описывает поведение определенной составной части ВИД: уравнения идеального вентильного коммутатора, электромашинной части двигателя, равновесия моментов на валу двигателя.

Процесс преобразования электрической энергии в механическую описывается уравнениями баланса энергий и мощностей, которые следуют из второго закона Кирхгофа для электрической цепи, образованной источником питания и фазной обмоткой.

Фаза ВИД обладает активным и изменяющимся в широком диапазоне индуктивным сопротивлением. Второй закон Кирхгофа для фазы в общем случае имеет вид:

$$u + e = i \cdot R,$$

где u – напряжение сети; i – мгновенное значение тока фазы; e – ЭДС, наведенная в фазе.

С учетом потокосцепления обмотки (Ψ),

$$u = i \cdot R + \frac{d\Psi}{dt}.$$

Потокосцепление Ψ является функцией тока, i и угла поворота ротора γ :

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{d\gamma} \frac{d\gamma}{dt} = L_{\text{д}} \frac{di}{dt} + \Omega \frac{d\gamma}{dt}$$

где $L_{\text{д}} = \frac{d\Psi}{di}$ – дифференциальная индуктивность фазы; $\Omega = \frac{d\gamma}{dt}$ – угловая частота вращения

ротора; $L_{\text{д}} \frac{di}{dt}$ – трансформаторная ЭДС, обусловленная изменением тока в фазе; $\Omega \frac{d\gamma}{dt}$ – ЭДС

вращения, связанная с изменением потокосцепления фазы, которое происходит в результате взаимного перемещения сердечников статора и ротора.

Тогда для напряжения источника питания можно записать уравнение

$$u = i \cdot R + L_{\text{д}} \frac{di}{dt} + \Omega \frac{d\gamma}{dt}.$$

Выразим уравнение мгновенного момента ВИД, основанное на мгновенной механической мощности: $p_{\text{мех}} = i\Omega \frac{d\Psi}{d\gamma} = \Omega M$.

Выражение для мгновенного электромагнитного момента через производную потокосцепления по углу поворота ротора: $M = i \frac{d\Psi}{d\gamma}$.

Индуктивность фазы для линейной магнитной системы зависит только от взаимного положения сердечников, а точнее, только от проводимости зазора, которая изменяется в широких пределах на интервале от рассогласованного до согласованного положения:

$$L = w^2 \mu_0 \frac{S_{\text{з}}}{\delta_{\text{з}}},$$

где L – индуктивность фазы; w – число витков фазы; $S_{\text{з}}$ – эквивалентная площадь воздушного пространства, через которую проходит магнитный поток; $\delta_{\text{з}}$ – эквивалентный зазор.

2. Основанные на схемах замещения магнитной цепи, где индуктивности и взаимные индуктивности фаз являются функциями положения ротора, а также фазных токов.

Подобная модель для двухфазного ВИД представлена в [5], при этом энергия магнитного поля определяется как:

$$W = \frac{1}{2} i_A^2 L_A(\gamma; i_A; i_B) + \frac{1}{2} i_B^2 L_B(\gamma; i_B; i_A) + \frac{1}{2} i_A i_B M(\gamma; i_A; i_B).$$

3. Основанные на представлении ротора машины эквивалентной обмоткой возбуждения.

Среди всех перечисленных типов моделей последний имеет структурно-топологическую привязку и не пресыщен математическими преобразованиями.

Моделирование характеристик ВИД. Процесс моделирования характеристик ВИД, конструкции, применяемых материалов, значений напряжения и токов фаз и получения предполагаемых результатов можно представить схемой на рисунке 1. Для каждого из этапов выполнен свой набор готовых шаблонов прототипов в различных программах моделирования, критерии для верификации, методики пошаговой реализации, критерии оптимизации. Все этапы взаимосвязаны и предполагают существующие конструкции и характеристики параметров, а также возможность изменения в зависимости от целей разработки; существующий инструментарий разработки позволяет решать исследовательские и оптимизационные задачи.

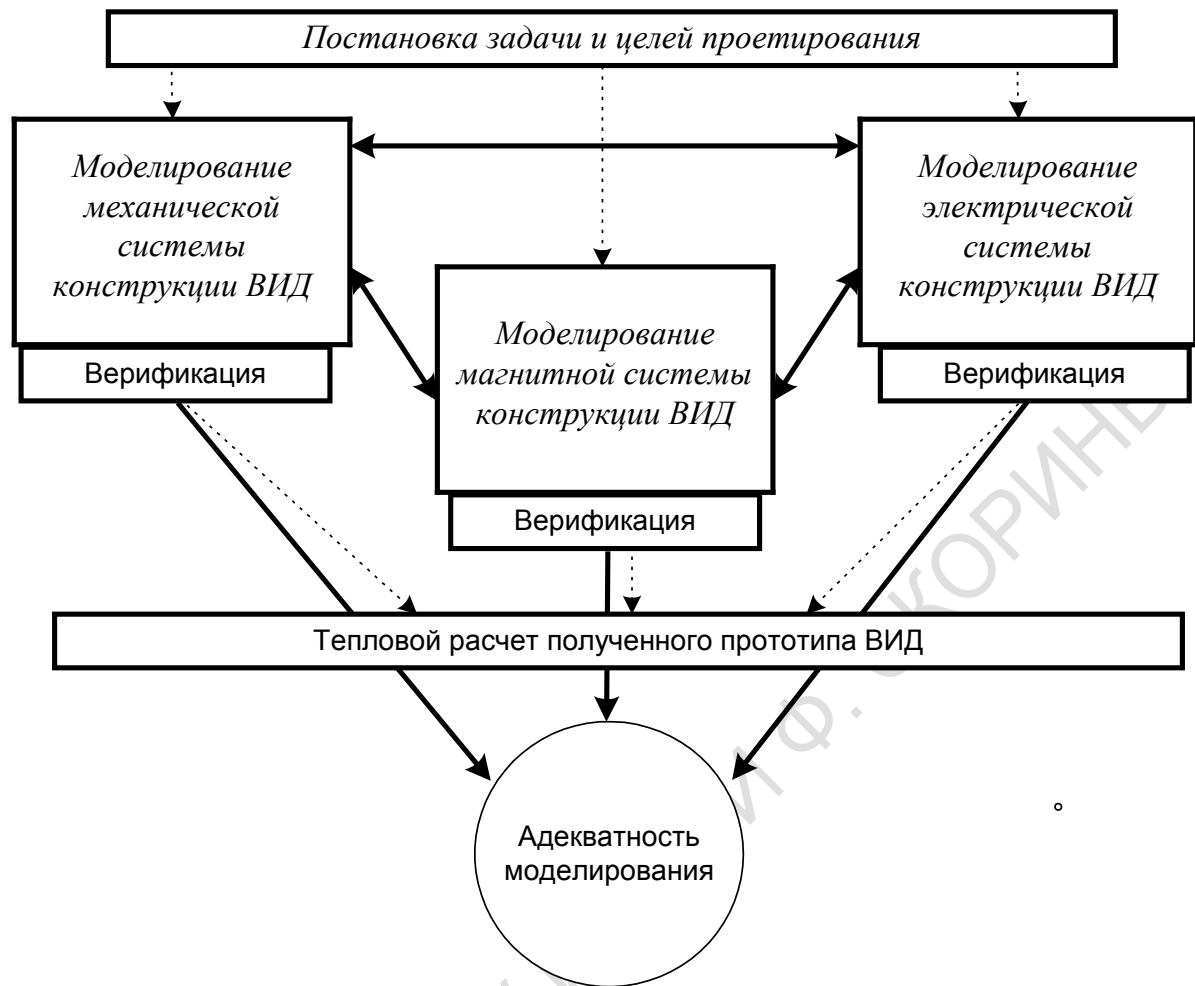
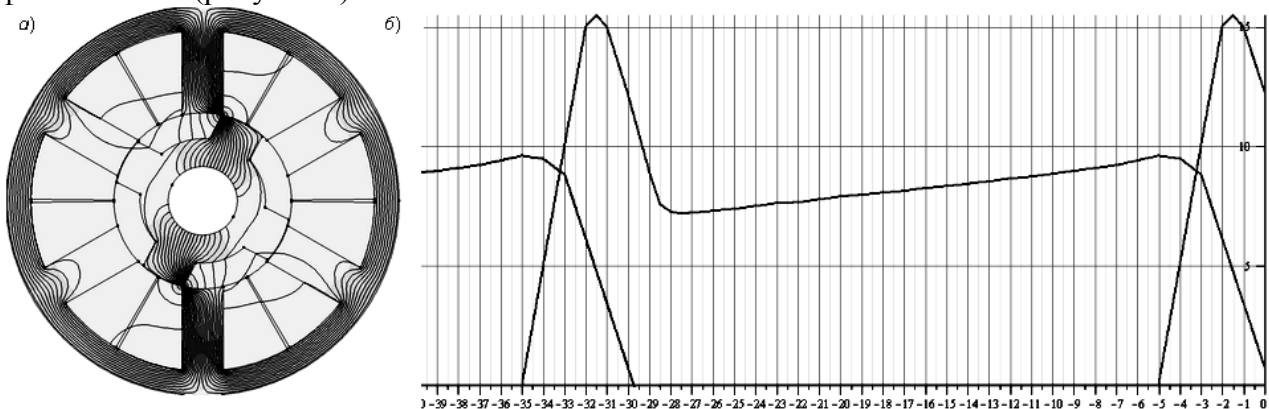


Рисунок 1 – Этапы разработки ВИД

Исследования характеристик ВИД проводились методом математического моделирования для m -фазного ВИД с независимым управлением фазами при сложном трапециидальном законе изменения токов; симметричной одиночной, парной и несимметричной коммутацией фазных токов (рисунок 2).

Рисунок 2 – Пример результатов расчета магнитной системы ВИД (*FEMM* и *Maple*):

a – картина поля линий магнитной индукции модели;

б – график изменения тока в фазе в зависимости от углового положения зубца ротора

Результаты сравнения аналитического и модельного расчета в программе *FEMM* представлены в таблице 1. Значимость отличий с помощью однофакторного дисперсионного анализа в программах Microsoft Excel и Statistica 6 указывает на то, что различие между средни-

ми статистически не значимо. Достигнутая точность моделирования дает возможность широкого практического использования данного способа расчета. Отклонения характеристик объясняются, по-видимому, просчетами физического моделирования, неизбежными ошибками при выборе приближенного характера кривой намагничивания стали магнитопровода, и количеством участков разбиения. В рассмотренном примере F -критерий показывает, что различие между средними статистически незначимо и нулевая гипотеза о равенстве средних значений магнитодвижущих сил для программы моделирования $FEMM$ и аналитического расчета не отвергается.

Таблица 1 – Результаты аналитического расчета и модельного эксперимента

Магнитодвижущая сила	Контур					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>
Аналитический расчет	494	497	498	8675	8675	8675
Результат моделирования	500	500	500	8673	8770	8600

Следует отметить возможность автоматизации процедур расчета, визуализации, выбора эффективных параметров с помощью программирования на языке *Femm lua console*. Используя возможности указанной программы, была реализована визуализация получаемых результатов моделирования, созданы шаблоны процедур верификации, написаны алгоритмы расчета различных целевых задач. Созданы шаблоны для импорта результатов программирования магнитной системы в другие программные комплексы (*Excel, Maple*).

На рисунке 3 приведены некоторые результаты исследования ВИД конфигурации 6/4 различных геометрических параметрах ротора и статора, а также сравнительная характеристика электромагнитных моментов при неизменном законе коммутации тока.

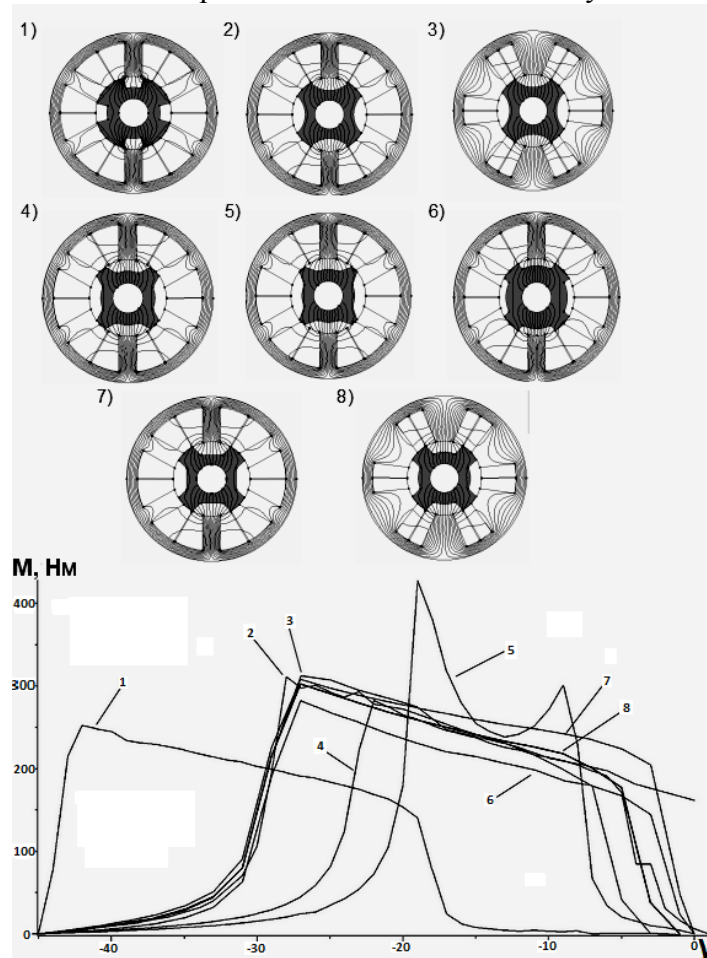


Рисунок 3 – Графическое распределение поля в ВИД конфигурации 6/4 при различных геометрических параметрах ротора и статора, сравнительная характеристика электромагнитных моментов

По горизонтальной оси отобразены значения углового положения зубца ротора относительно зубца статора (γ), по вертикальной оси – электромагнитный момент на валу ротора (M , Нм).

Для составления расчетных уравнений математической модели электрической системы ВИД использованы три уравнения электрического равновесия и два уравнения механики привода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \left(\frac{\partial \Psi_A}{\partial i_A} \right)^{-1} \cdot \left(u_A - i_A R - \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_B} \cdot \frac{di_B}{dt} - \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_C} \cdot \frac{di_C}{dt} - \Omega \frac{\partial \Psi_A}{\partial \gamma} \right) \\ \frac{di_B}{dt} = \left(\frac{\partial \Psi_B}{\partial i_B} \right)^{-1} \cdot \left(u_B - i_B R - \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_A} \cdot \frac{di_A}{dt} - \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_C} \cdot \frac{di_C}{dt} - \Omega \frac{\partial \Psi_B}{\partial \gamma} \right) \\ \frac{di_C}{dt} = \left(\frac{\partial \Psi_C}{\partial i_C} \right)^{-1} \cdot \left(u_C - i_C R - \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_A} \cdot \frac{di_A}{dt} - \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_B} \cdot \frac{di_B}{dt} - \Omega \frac{\partial \Psi_C}{\partial \gamma} \right) \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{\delta\delta} - M_C) \\ \frac{\partial \gamma}{dt} = \Omega \end{array} \right.$$

где u_A, u_B, u_C – напряжения, приложенные к обмоткам фаз А, В, С соответственно; i_A, i_B, i_C – токи фаз А, В, С; R – активное сопротивление; Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – потокосцепления фаз А, В, С; $\frac{d\Psi_x}{di_y}$ – дифференциальные индуктивности фаз; $\frac{d\Psi_x}{d\gamma}$ – коэффициент против ЭДС, γ – угол поворота ротора, Ω – частота вращения ротора, J – момент инерции ротора, $M_{\delta\delta}$ – электромагнитный момент двигателя, M_C – момент сопротивления.

Система должна быть дополнена уравнениями электромагнитных связей – зависимостями потокосцеплений фаз от токов и угла поворота ротора

$$\begin{cases} \Psi_A = f(i_A; i_B; i_C; \gamma); \\ \Psi_B = f(i_A; i_B; i_C; \gamma); \\ \Psi_C = f(i_A; i_B; i_C; \gamma), \end{cases}$$

а также зависимостью электромагнитного момента двигателя $M_{\delta\delta}$ от токов фаз и угла поворота $M_C = \sum M_x(i_A; i_B; i_C; \gamma)$ и зависимостью момента сопротивления M_C .

Потокосцепления определяются на основе расчёта магнитного поля двигателя. Пример получения зависимости потокосцепления от угла поворота при моделировании магнитной системы представлен на рисунке 4.

Разработанная методика расчета индуктивностей фаз вентильной индукторной машины в функции углового положения ротора отличается от известных методик. Отличие состоит в получении функциональной аналитической зависимости между геометрией зубцовой зоны и значением индуктивности. Выявлено влияние геометрических размеров зубцовой зоны на энергетические и динамические характеристики ВИД.

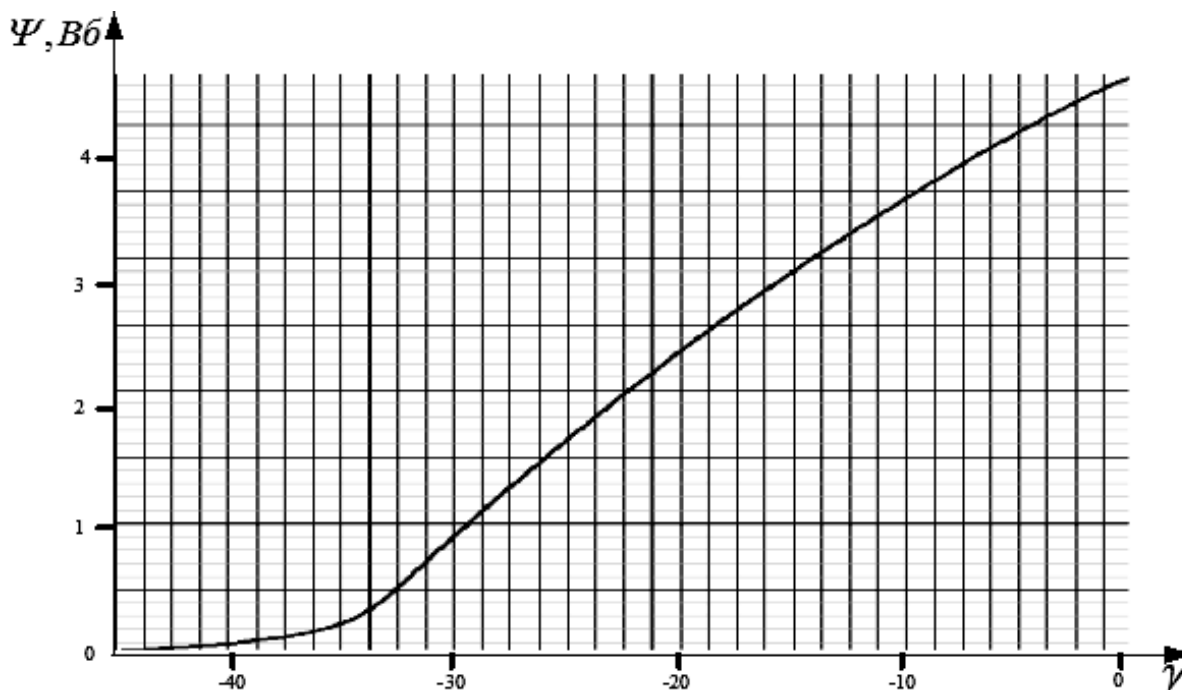


Рисунок 4 – Зависимость потокосцепления от угла поворота

Заключение. В рамках данной работы были созданы модели ВИД, позволяющие исследовать его характеристики при любой конфигурации фазных обмоток и коммутации токов в них. Для реализации модели необходима информация об архитектуре двигателя, включающая число фаз и систему коммутации, число полюсов статора и число полюсов ротора, теплопроводности элементов. Полученная модель учитывает взаимодействие магнитных потоков, сцепленных с фазами машины и насыщение стали магнитопровода.

Литература

1. Вентильно-индукторный электропривод. Доклады научно-практического семинара. – М. : Издательство МЭИ, 2006. – 112 с.
2. Кузнецов, В.А. Вентильно-индукторные двигатели / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичёв. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
3. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. Version 4.0; June 17, 2004. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://femm.foster-miller.net>. – Дата доступа: 21.03.2014.
4. Ткачук, В. Електромеханотроніка. / В. Ткачук – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
5. Голландцев, Ю.А. Уравнения вентильного индукторно-реактивного двигателя при одиночной коммутации фаз / Голландцев Ю.А. // Научно-технический журнал «Электротехника». – М. : ЗАО «Знак». – 2003. – № 7/03. – С. 45–51.