

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Радимов И.Н., к.т.н., доц.,
 Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"
 Украина, 65018, Одесса, ул. Дальницкая, 23
 Тел.(0482) 37-70-66, E-mail: inrad@mail.ru

Рымша В.В., к.т.н., доц.,
 Одесский национальный политехнический университет
 Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин
 Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"
 Украина, 65018, Одесса, ул. Дальницкая, 23
 Тел.(0482) 37-70-66, 38-68-11, E-mail: v_rimsha@hotmail.com

Малеваный О.Е.
 Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"
 Украина, 65018, Одесса, ул. Дальницкая, 23
 Тел.(0482) 37-70-66, E-mail: v_rimsha@hotmail.com

Приведены результаты исследования статического и динамических режимов вентильного индукторного двигателя. Представлена модель статики, базирующаяся на расчете магнитного поля методом конечных элементов с последующим определением электромагнитного момента через натяжения. Рассмотрен подход к моделированию динамических режимов, основанный на использовании двумерных ТП-В-сплайнов.

Наведено результати дослідження статичного і динамічного режимів вентильного індукторного двигуна. Представлено модель статики, що базується на розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів з наступним визначенням електромагнітного моменту через натяги. Розглянуто підхід до моделювання динамічних режимів, заснований на використанні двомірних ТП-В-сплайнів.

ВСТУПЛЕНИЕ

Вентильные индукторные двигатели (ВИД) (в англоязычной литературе Switched Reluctance Motor), благодаря простоте конструктивного исполнения, технологичности изготовления и надежности, получают все большее распространение на рынке регулируемых электрических машин [1,2]. В научно-производственном предприятии «Одесмонтажспецпроект» в рамках проекта «Разработка, проектирование и производство новых электромеханических устройств и систем» осуществлена расчетно-конструкторская разработка и изготовлен ряд опытных образцов ВИД для производственных и транспортных механизмов различного назначения. В настоящей статье представлены результаты исследований статических и динамических режимов четырехфазного ВИД бескорпусной конструкции с соотношением чисел полюсов статора к ротору – 8/6 (рис. 1).

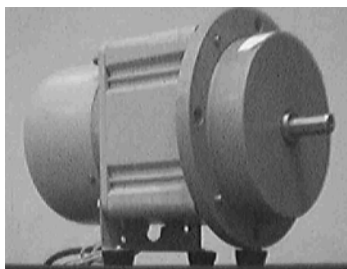


Рис. 1.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Математическая модель, описывающая режимы работы ВИД, представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$U = IR + \frac{d\Psi}{dt},$$

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt},$$
(1)

где U - напряжение; I - ток фазы; R - сопротивление фазы; Ψ - потокосцепление фазы; M - результирующий электромагнитный момент от действия всех фаз; M_C - момент сопротивления; J - момент инерции ротора; ω - угловая скорость ротора; t - время.

Первое уравнение системы (1) – дифференциальное уравнение электрического равновесия, второе – дифференциальное уравнение механического равновесия движущихся частей ВИД.

После несложных математических преобразований первое уравнение системы (1) может быть записано следующим образом:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + \omega I \frac{dL}{d\Theta},$$
(2)

где L - индуктивность фазы, являющаяся функцией угла поворота ротора Θ и тока фазы I . В этом случае система (1) преобразуется к виду:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + \omega I \frac{dL}{d\Theta},$$

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt},$$
(3)

Решение системы (3) позволяет найти динамические характеристики ВИД $I, M, \omega = f(t)$, а также построить его механическую характеристику $\omega = \varphi(M)$. Очевидно, что для решения системы (3) первоначально требуется тем или иным способом получить следующие зависимости:

$$L = f_1(I, \Theta),$$
(4)

$$M = f_2(I, \Theta).$$
(5)

Зависимости (4) и (5) являются существенно нелинейными, что определяется принципом работы и геометрическими особенностями ВИД. Интерес представляет получение зависимости (5). В связи с этим рассмотрим возможные подходы к определению статического электромагнитного момента ВИД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

Существует три способа определения электромагнитного момента электромеханического преобразователя энергии [3]:

- через изменение энергии или коэнергии магнитного поля при малом перемещении;
- через натяжения в магнитном поле;
- через объемную и поверхностную плотность электромагнитных сил в магнитном поле.

Через изменение коэнергии электромагнитный момент ВИД можно определить как:

$$M = \left. \frac{\partial W_K}{\partial \Theta} \right|_{I=const},$$
(6)

где W_K - коэнергия системы.

Для линейной магнитной цепи уравнение (6) может быть преобразовано к виду:

$$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\Theta}.$$
(7)

Очевидно, что для расчета момента ВИД в пусковых режимах и в режимах допустимых перегрузок, сопровождающихся большими токами и, следовательно, высоким уровнем насыщения магнитной цепи, использование уравнения (7) неприемлемо. В то же время некоторыми авторами, например [4], уравнение (7) применяется для расчета электромагнитного момента в случае насыщенной машины. При этом зависимость (4) определяется по результатам численного расчета магнитного поля в нелинейной постановке задачи.

Попытка преобразования формулы (7) для расчета момента ВИД с учетом локального насыщения его магнитной цепи предпринята в работе [5]. Аппроксимация реальных характеристик намагничивания машины $\Psi = f(I, \Theta)$ в данном случае осуществляется двумя отрезками кусочно-линейной функции, один из которых соответствует ненасыщенному участку, а другой – насыщенному участку кривой намагничивания. При этом вводятся дополнительные упрощающие допущения на вид кривых намагничивания.

В [2] на основании уравнения (6) получена формула для расчета электромагнитного момента с учетом насыщения стали. Формула базируется на аналитической аппроксимации Ψ как функции I и Θ . Для получения результата необходимо расчетным или экспериментальным путем получить зависимости $\Psi = f(I)$ при $\Theta = \text{var}$, а затем, проведя дополнительные геометрические построения и подбор в режиме диалога с ЭВМ, определить коэффициенты, входящие в аппроксимирующее выражение. Несомненным достоинством полученной в [2] формулы является возможность быстрого анализа и оптимизации различных вариантов ВИД. К недостаткам можно отнести построение семейства характеристик намагничивания машины на базе расчета магнитной цепи, которая представляется в виде цепочки из сосредоточенных магнитных сопротивлений, что не позволяет учесть всего многообразия явлений, происходящих в существенно нелинейной ферромагнитной среде ВИД, и неизбежно сопровождается рядом дополнительных упрощающих допущений.

Более трудоемкий, но менее эффективный подход к расчету электромагнитного момента ВИД на основе уравнения (6) с учетом насыщения предложен в работе [6]. Подход базируется на многочисленных геометрических построениях, которые плохо поддаются формализации, что существенно ограничивает сферу его применения.

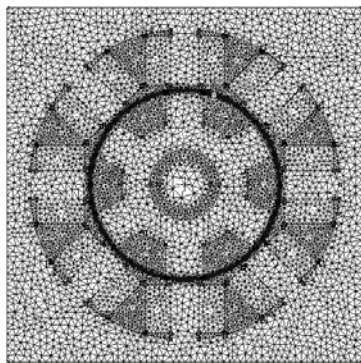
Рассмотренные выше подходы к определению электромагнитного момента ВИД энергетическим способом дают приемлемые по точности результаты в тех случаях, когда магнитное поле двигателя выражается аналитически, либо когда процессы в двигателе описываются уравнениями его электрической и магнитной цепей [3]. Повышение точности расчета электромагнитного момента ВИД возможно на основе применения численных методов исследования магнитного поля с учетом реального насыщения стали, например, метода конечных элементов (МКЭ). Если магнитное поле рассчитывается численно, то расчет момента через изменение энергии или коэнергии приводит к тому, что их приращение по (6) определяется в виде малой разности двух больших величин. При этом получить достаточно точный результат весьма затруднительно. В этом случае электромагнитный момент предпочтительно определять вторым или третьим способом, т.е. через натяжения в магнитном поле, либо через объемную и поверхностную плотность электромагнитных сил [3].

Ниже приведены результаты определения установившегося режима рассматриваемого ВИД на базе расчета магнитного поля МКЭ.

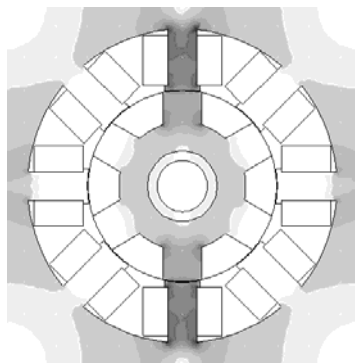
СТАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

При решении поставленной задачи магнитное поле рассчитывалось МКЭ для ряда положений ротора относительно статора. Число узлов конечно-элементной сетки в среднем составляло 22000, число треугольных элементов – 43000, что позволило достаточно подробно аппроксимировать геометрию ВИД (рис. 2,а). Точность решения задачи была не ниже $1 \cdot 10^{-8}$. Смещение ротора осуществлялось от согласо-

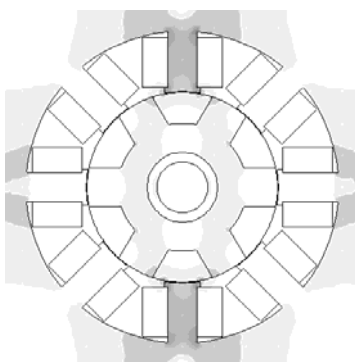
ванного положения, когда ось полюса ротора совпадает с осью полюса возбужденной фазы статора к полностью рассогласованному положению, при котором ось паза ротора совпадает с осью полюса возбужденной фазы статора. Шаг смещения составлял 1 градус. В качестве иллюстрации результатов решения полевой задачи ниже представлено распределение магнитной индукции в магнитопроводе ВИД, соответствующее согласованному положению (рис. 2,б) и полностью рассогласованному положению (рис. 2,в) ротора относительно статора.



а)



б)



в)

Рис. 2.

По результатам расчета магнитного поля определялись зависимости (4) и (5), причем электромагнитный момент M рассчитывался через натяжения в магнитном поле [3]:

$$M = \oint_S [\vec{r}T_n]dS, \quad (8)$$

где S - поверхность, охватывающая ротор ВИД;

\vec{r} - радиус-вектор, связывающий начало системы координат с элементом dS поверхности S ;

\vec{T}_n - тензор натяжения.

Результаты расчета поверхности (5) приведены на рис. 3.^Э

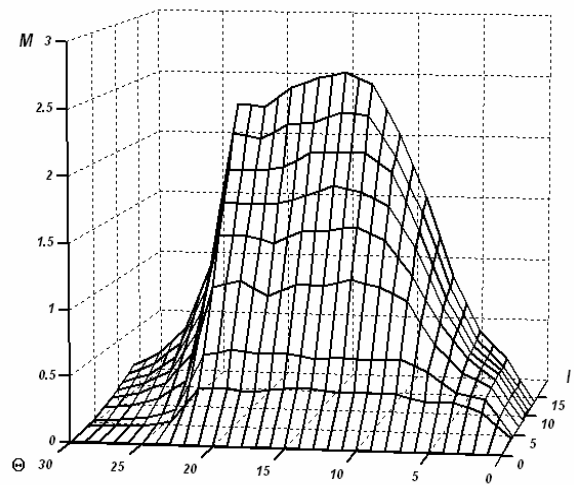


Рис. 3.

Сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента [7] позволяет рекомендовать рассмотренную математическую модель для исследования режимов работы ВИД.

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

Выше были проанализированы подходы к расчету статического электромагнитного момента ВИД, выявлены их достоинства и недостатки. Отмечено, что магнитное поле в насыщенной машине можно рассчитать только численным методом, а момент – через натяжения в магнитном поле. Представляет интерес также выявить влияние насыщения сердечника ВИД на величину электромагнитного момента и оценить погрешность при использовании уравнения (7) для расчета момента насыщенной машины.

Решение данной задачи осуществлялось для сердечников, изготовленных из двух различных ферромагнитных материалов:

- из материала, насыщающегося при заданных токах и обладающего характеристикой намагничивания $\nu = 1/(\mu_0\mu_r) = f(B)$ (вариант 1 – расчет момента через натяжения);

- из материала, ненасыщающегося при заданных токах и обладающего постоянной бесконечно большой магнитной проницаемостью $\mu_r = 2400 \approx \infty$ (вариант 2 – расчет момента через натяжения);

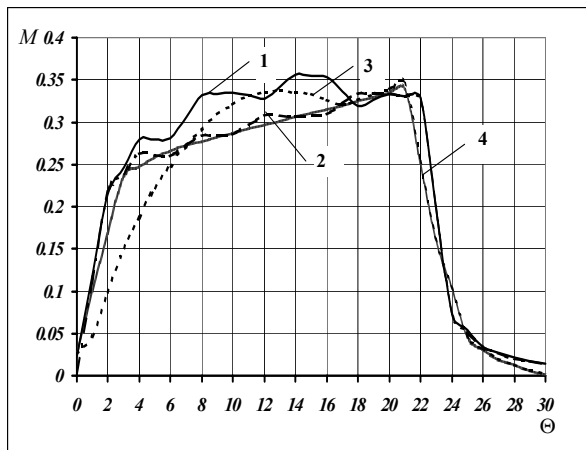
^Э Для улучшения качества просмотра графиков размерности величин на них не показаны. В статье приняты следующие размерности величин: I – А, M – Нм, ω – c^{-1} , Θ – механические градусы, t – с.

Расчеты электромагнитного момента проводились по формуле (7) также для двух вариантов:

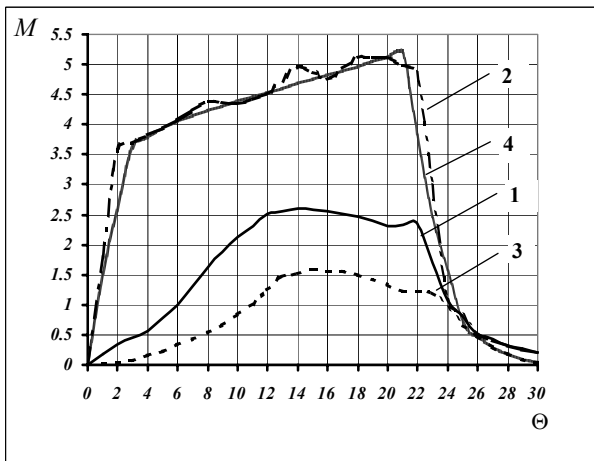
- зависимость $L = f(\Theta)$ при данном значении I является нелинейной функцией и определяется из расчета магнитного поля с учетом насыщения (вариант 3);

- зависимость $L = f(\Theta)$ при данном значении I является линейной функцией (вариант 4);

Результаты расчетов представлены на рис. 4, где номера при зависимостях соответствуют номерам указанных выше вариантов. Рис. 4,а отражает результаты расчетов при токе, соответствующем прямолинейному ненасыщенному участку кривой намагничивания машины, а рис. 4,б – при токе, соответствующем насыщенному участку кривой намагничивания.



а)



б)

Рис. 4.

Из представленных на рис. 4 результатов следует, что в случае ненасыщенной магнитной системы зависимости $M = f(\Theta)$ отличаются незначительно. Если же магнитная система ВИД насыщена, то некорректный учет насыщения ферромагнитных материалов, а также использование уравнения (7) для расчета насыщенной машины приводит к получению существенно завышенных, либо существенно заниженных, по сравнению с реальными, результатов.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для расчета динамических характеристик системы (3) преобразуется к системе нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, представленных в нормальной форме. Затем осуществляется расчет МКЭ статического режима ВИД для заданной совокупности токов I и углов Θ и формируются пространственные B -сплайн-тензорные произведения (ТП- B -сплайны) [8], служащие для интерполяции зависимостей (4) и (5). Для численного решения преобразованной системы (3) могут быть использованы такие методы, как метод Эйлера (Э), классический метод Рунге-Кутты (РК) и его модификации - Рунге-Кутта-Мерсона (РКМ) и Рунге-Кутта-Фельберга (РКФ).

Оценим поведение рассмотренных выше методов в зависимости от длины шага интегрирования по времени $h = \Delta t$ на примере расчета прямого пуска ВИД. В качестве критерия оценки примем выход на значение установившейся угловой скорости ω . Результаты расчетов представлены на рис. 5.

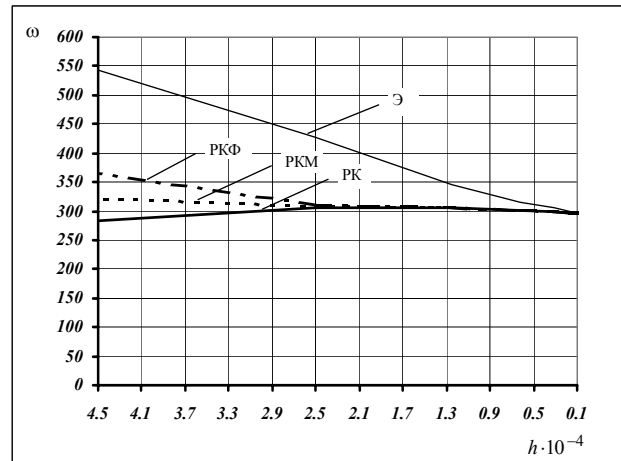
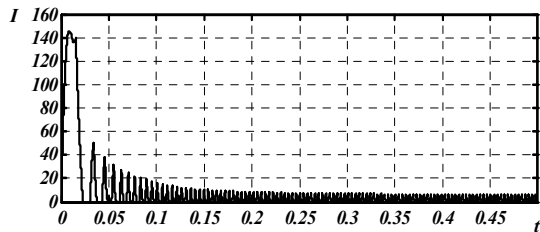
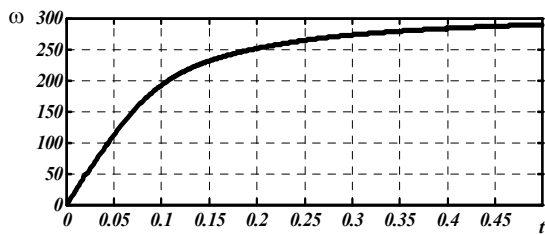


Рис. 5.

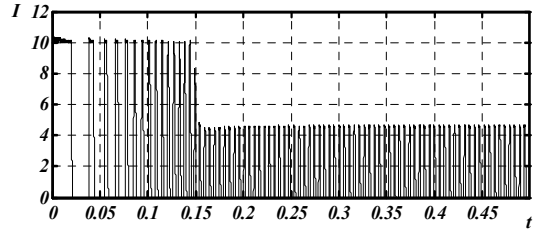
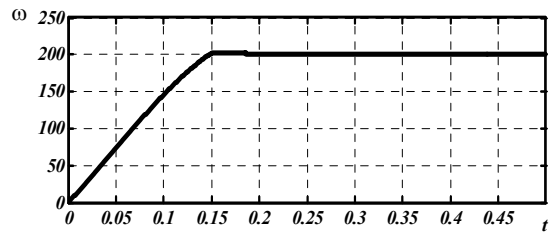
Из рис. 5 видно, что при использовании метода Эйлера установившееся значение $\omega = 300 \text{ c}^{-1}$ достигается при шаге $h = 0,1 \cdot 10^{-4}$. Получение такого же значения ω , но при гораздо большем шаге $h = 2,5 \cdot 10^{-4}$, возможно за счет применения семейства методов Рунге-Кутты. При этом наблюдается существенное снижение времени счета.

Результаты моделирования прямого пуска ВИД в виде «осциллограмм» $I, M, \omega = f(t)$ представлены на рис. 6. Данные рис. 6,а отражают результаты моделирования процесса прямого пуска двигателя, а данные рис. 6,б – изменение значений токов и момента для квазиустановившегося режима. Жирной линией на рис. 6,б показано изменение суммарного момента ВИД.

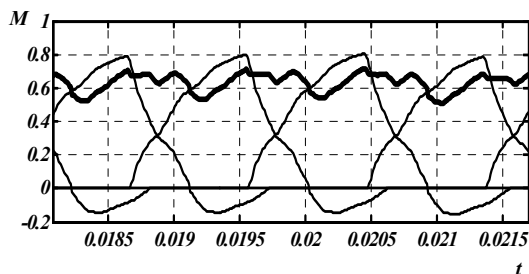
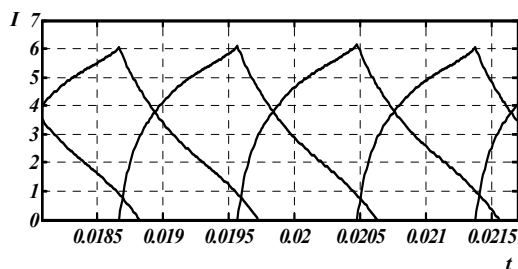
Далее исследовалась работа ВИД в составе электропривода с автоматической системой регулирования скорости. Силовая часть электропривода (транзисторный инвертор) выполнена по схеме Миллера с двумя верхними и четырьмя нижними ключами [1].



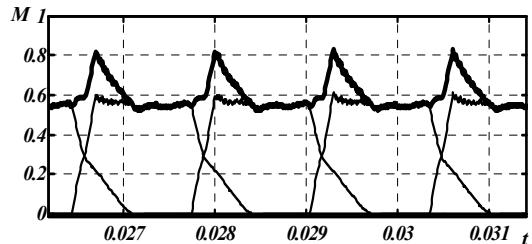
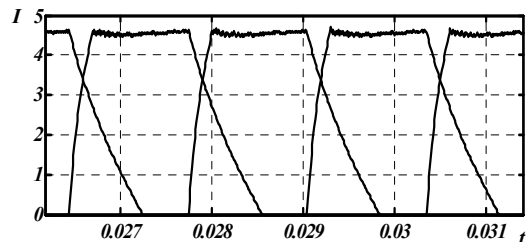
а)



а)



б)
Рис. 6.



б)
Рис. 7.

При моделировании цепь обратной связи по скорости считалась безинерционной, был принят пропорционально-интегральный регулятор скорости, на выходе которого формировался сигнал задания амплитудного значения тока обмотки двигателя. При превышении током двигателя заданного значения выполнялось выключение верхних ключей инвертора на короткое время, приводящее к спадающему току. Максимальному сигналу на выходе регулятора скорости соответствовал определенный уровень ограничения пускового тока двигателя и момента. В расчетах принималось, что момент сопротивления электропривода равен номинальному, а момент инерции нагрузки – моменту инерции ротора двигателя. Заданная угловая скорость составляла 200с^{-1} . Результаты моделирования представлены на рис. 7. Обозначения на рис. 7 – аналогичны обозначениям рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and their Control. - Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993, 203 p.

[2] Ткачук В. Электромехатроніка: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”. 2001. – 404 с.
 [3] Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высш. шк., 1989. - 312 с.
 [4] O. Ichinokura, S.Suyama, T.Watanabe, H.J.Guo “A new calculation model of switched reluctance motor for use on Spice”, IEEE Trans. on magnetics, vol. 37, July 2001, pp. 2834-2836.
 [5] Бычков М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы // Электричество. – 1998. - №6. – С. 50-53.
 [6] Галайко Л.П. Расчет зависимостей тока и момента вентильного индукторного двигателя различными методами // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – 2001. - №17. – С. 33-35.
 [7] Слободниченко Б.И., Рымша В.В., Порайко А.С., Радимов И.Н., Малеваный О.Е. Магнитное поле и электромагнитный момент вентильного индукторного двигателя // Техн. електродинаміка. Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки” – 2002. – ч.5. – С. 33-34.
 [8] Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.