

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Одним из основных направлений развития энергетики Украины в настоящее время является замена старых энергоёмких технологий более новыми и экономичными. Поэтому все более актуальными становятся вопросы оценки эффективности работы установленного оборудования и целесообразности выбора нового. Так как силовой электропривод является главным потребителем в энергосистеме и его энергетические показатели служат основным критерием оценки эффективности работы, то все большее внимание исследователей и инженеров привлекает применение прикладных пакетов компьютерных программ, которые позволяют на разных этапах решить достаточно сложную проблему комплексного анализа режимов работы различных систем электропривода.

Данная работа посвящена исследованию частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением, который рекомендуется сегодня к применению для большой группы машин и механизмов в различных областях промышленности. Достоинствами векторного управления являются: точная отработка заданной скорости с компенсацией скольжения, сохранение необходимой величины момента при малых частотах, плавность работы двигателя и быстрая реакция на скачки нагрузки вследствие высокой динамики регулирования.

Математическое описание систем электропривода с векторным управлением, приведенное в работах [1, 2], весьма громоздко и реализация на его основе структурных схем и моделей без существенных упрощений затруднительна. Более удобным является использование виртуальных моделей, которые специально предназначены для исследования электромагнитных процессов и энергетических характеристик электромеханических систем практически любой сложности.

Предлагаемые исследования системы электропривода переменного тока являются продолжением и развитием материала, изложенного в работах [3, 4]. При синтезе виртуальной модели использованы инструментальные средства одной из последних версий системы компьютерного моделирования *MATLAB 7.0.1*, которая дополнена специальными блоками и демонстрационными примерами, касающимися непосредственно систем электропривода. Принципы построения и исследования отдельных блоков виртуальных моделей изложены в работах [5, 6.], а систем управления электроприводами – в монографии [7].

Виртуальная модель асинхронного электропривода с векторным управлением изображена на рис. 1.

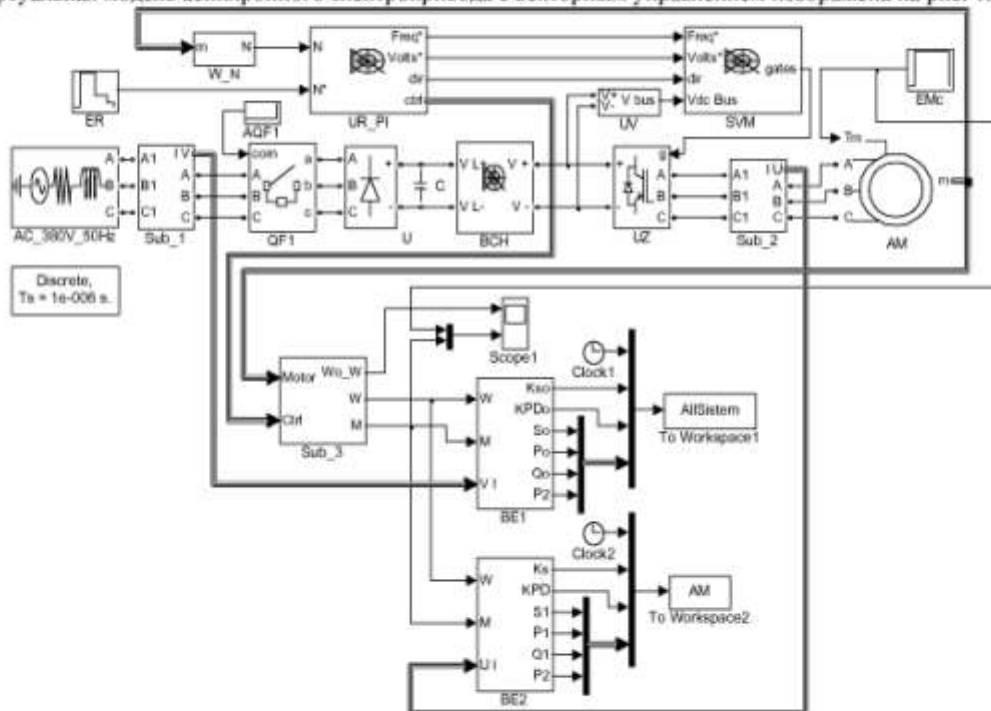


Рис. 1. Виртуальная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Силовой канал электропривода собран на базе виртуальных блоков пакета расширения *SimPowerSystem* и содержит следующие основные элементы:

*AC 380V 50Hz* – питающая сеть трехфазного напряжения переменного тока;

*QF1* – трехфазный автоматический выключатель с блоком управления *AQF1*, который выдает команды на вкл./откл.;

*U* – 3-фазный неуправляемый выпрямитель на диодах, создающий промежуточную цепь постоянного тока;

*C* – конденсаторный фильтр, обеспечивающий работу выпрямителя как источника напряжения;

*UZ* – трехфазный автономный инвертор напряжения на *IGBT*-модулях;

*AM* – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

Порты *A, B* и *C* являются выводами статорной обмотки машины, порт *Tm* предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту *m* формируется векторный сигнал, состоящий из токов, потоков и напряжений статора и ротора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, скорости вращения вала, а также его углового положения. Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке *SimPowerSystems* предусмотрен блок *MachinesMeasurementDemux*.

Модель асинхронной машины включает в себя электрическую часть, представленную моделью пространства состояний четвертого порядка и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору.

Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной системы координат (оси *d-q*) и имеют вид:

$$\begin{aligned} V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} - \omega \varphi_{ds}; & V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs}; \\ V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}; & V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}; \\ T_e &= 1,5(\varphi_{ds} i_{ds} - \varphi_{qs} i_{ds}), \end{aligned}$$

где

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}; \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}; \varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}; \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}; L_s = L_{ls} + L_m; L'_r = L'_{lr} + L_m.$$

Механическая часть машины описывается двумя уравнениями

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (T_e - F \omega - T_m), \quad \frac{d}{dt} \theta = \omega.$$

Обозначения в уравнениях асинхронной машины:

$R_s, L_{ls}$  – сопротивление и индуктивность рассеяния статора;

$R'_r, L'_{lr}$  – сопротивление и индуктивность рассеяния ротора;

$L_m$  – индуктивность цепи намагничивания;

$L_s, L'_r$  – полные индуктивности статора и ротора;

$V_{qs}, i_{qs}$  – проекции напряжения и тока статора на ось *q*;

$V'_{qr}, i'_{qr}$  – проекции напряжения и тока ротора на ось *q*;

$V_{ds}, i_{ds}$  – проекции напряжения и тока статора на ось *d*;

$V'_{dr}, i'_{dr}$  – проекции напряжения и тока ротора на ось *d*;

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$  – проекции потокоцепления статора на оси *d* и *q*;

$\varphi'_{dr}, \varphi'_{qr}$  – проекции потокоцепления ротора на оси *d* и *q*;

$\omega$  – угловая скорость ротора;

$\theta$  – угловое положение ротора;

$J$  – момент инерции ротора;

$T_e$  – электромагнитный момент двигателя;

$T_m$  – статический момент нагрузки;

$F$  – коэффициент трения.

В окно задания параметров виртуального блока асинхронной машины заносятся следующие данные:

Тип ротора (*Rotor type*). Значение параметра выбирается из списка:

- *Squirrel-Cage* – короткозамкнутый ротор;
- *Wound* – фазный ротор.

Система координат (*Reference frame*). Значение параметра выбирается из списка:

- *Rotor* – неподвижная относительно ротора;
- *Stationary* – неподвижная относительно статора;
- *Synchronous* – вращающаяся вместе с полем.

Номинальная мощность  $P_n$  (ВА), действующее линейное напряжение  $U_n$  (В) и номинальная частота  $f_n$  (Гц).

Сопротивление  $R_s$  (Ом) и индуктивность  $L_s$  (Гн) статора.

Сопротивление  $R'_r$  (Ом) индуктивность  $L'_r$  (Гн) ротора, приведенные к обмотке статора.

Взаимная индуктивность  $L_m$  (Гн).

Момент инерции  $J$  (кг·м<sup>2</sup>), коэффициент трения  $F$  (Н·м·с) и число пар полюсов  $p$ .

Начальные условия задаются в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

- $s$  – скольжение;
- $th$  – фаза (град.);
- $isa, isb, isc$  – начальные значения токов статора (А);
- $pha, phb, phc$  – начальные фазы токов статора (град.).

При моделировании использованы паспортные данные электродвигателя с короткозамкнутым ротором типа 4АН280S6: номинальная мощность – 90 кВт; номинальная скорость – 978 об/мин; номинальное напряжение – 380 В; номинальный КПД – 0,925; номинальный коэффициент мощности – 0,89; число пар полюсов – 3.

Управляюще-информационный канал электропривода реализован с помощью блоков основного пакета *Simulink*.

По структуре система управления выполнена одноконтурной с одним цифровым ПИ-регулятором скорости *UR\_PI* и отрицательной обратной связью по скорости. Сигналы заданных скоростей выдаются блоком *ER*, а значение пассивного момента нагрузки формирует блок *EMc*. Через блок *W\_N* масштабируется сигнал фактической скорости. Непосредственно векторное управление обеспечивает структура блока *SVM*, на входы которого подаются сигналы от регулятора скорости, а через датчик напряжения *UV* поступает информация о величине выпрямленного напряжения. Выходной сигнал блока *SVM* является управляющим для вентилей автономного инвертора *UZ*.

Для реализации тормозных режимов предназначен специальный блок *BCH*, имеющий тормозной резистор, на котором выделяется энергия при динамическом торможении. Частота коммутации резистора обеспечивается пропорциональным регулятором через *IGBT*-ключ.

Подсистема *Sub\_3* выделяет сигналы заданной и фактической скоростей, а также электромагнитного момента двигателя и момента нагрузки.

Задаваемая скоростная диаграмма работы модели соответствует следующему алгоритму:

- $0 < t \leq 1$  с – пауза перед запуском;
- $1 < t \leq 3$  с – разгон электропривода до максимальной скорости  $\omega_{max}$ ;
- $3 < t \leq 4$  с – движение с установившейся максимальной скоростью  $\omega_{max}$ ;
- $4 < t \leq 5$  с – замедление электропривода до половинной скорости  $\omega_{max}/2$ ;
- $5 < t \leq 6,4$  с – движение с установившейся скоростью  $\omega_{max}/2$ ;
- $6,4 < t \leq 7,2$  с – замедление электропривода до скорости  $\omega_{max}/9$ ;
- $7,2 < t \leq 7,8$  с – движение с установившейся скоростью  $\omega_{max}/9$ ;
- $7,8 < t < 8$  с – торможение электропривода до полной остановки;
- $8 < t < 9$  с – пауза после остановки;
- $t = 9$  с – окончание моделирования.

Динамические процессы, протекающие в рассматриваемой системе электропривода контролируются осциллографом *Scope1*. На рис. 2 представлены скоростные (фактическая и заданная скорости) и нагрузочные (момент нагрузки и электромагнитный момент) диаграммы работы системы электропривода за рассматриваемый период моделирования.

Полученная скоростная диаграмма показывает высокую точность отработки заданной скорости во всем диапазоне регулирования, кроме начального участка разгона, что связано с необходимостью преодоления пассивного момента нагрузки.

Диаграмма моментов иллюстрирует постоянный характер нагрузки, а также выполнение основного уравнения движения электропривода при затухающих колебаниях на участках запуска и торможения. Наличие колебаний в кривой момента предопределяется самой структурой системы управления, в которой отсутствует канал регулирования тока (момента). Такая структура предлагается в настоящее время на рынке Украины практически всеми ведущими фирмами производителями электротехнической продукции.

Совместное рассмотрение скоростной диаграммы и диаграммы моментов позволяет определить двигательный режим работы системы электропривода (знаки угловой скорости и момента совпадают).

К основным энергетическим характеристикам электропривода обычно относят рабочие характеристики. Это зависимости активной, реактивной и полной потребляемой мощности от мощности нагрузки на валу двигателя:  $P, Q, S = f(P2)$ .

Эти характеристики позволяют определить еще два важных показателя: коэффициент полезного действия (*KPD*) -  $\eta = P2 / P$  и коэффициент мощности (*Ks*) -  $\cos\varphi = P / S$ .

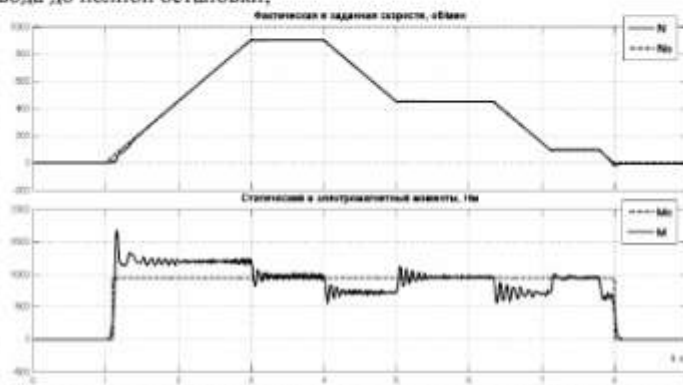


Рис. 2. Скоростные и нагрузочные диаграммы асинхронного электропривода с векторным управлением

Основные энергетические показатели для системы электропривода в целом и для двигателя в отдельности определяются соответственно подсистемами *BE1* и *BE2* согласно сигналам, подаваемым блоками *Sub\_1* и *Sub\_2*. На входы *BE1* и *BE2* подаются также сигналы фактической угловой скорости  $\omega$  и момента двигателя  $M$  для вычисления полезной мощности на валу двигателя  $P2 = M\omega$ .

Подсистемы *Sub\_1* и *Sub\_2* представляют собой комплект датчиков, которые выдают информацию о мгновенных значениях токов и напряжений в каждой фазе соответственно на входе всей системы и непосредственно в обмотке статора двигателя.

Основным элементом подсистем *BE1* и *BE2* является блок *Active & Reactive Power*, который из трехфазной системы фазных напряжений и токов выделяет активную  $P$  и реактивную  $Q$  составляющую мощности, а затем определяется и полная мощность  $S$ .

Энергетические показатели в течение периода моделирования фиксируются в рабочем пространстве системы *MATLAB* с помощью блоков *To Workspace 1* (для всей системы в целом) и *To Workspace 2* (для двигателя).

На рис. 3 показаны временные диаграммы изменения полной мощности и ее составляющих за моделируемый период для системы в целом и для двигателя в отдельности.

Диаграмма мощностей всей системы (рис. 3, а) наглядно отображает динамику изменения полной мощности и ее составляющих на всех характерных участках скоростной диаграммы. При этом потребление реактивной мощности незначительно, поэтому кривые полной и активной мощностей практически совпадают.

Из диаграммы мощностей двигателя (рис. 3, б) виден процесс возрастания потребления реактивной составляющей, что приводит к увеличению потребления полной мощности. При этом активная составляющая фактически остается неизменной.

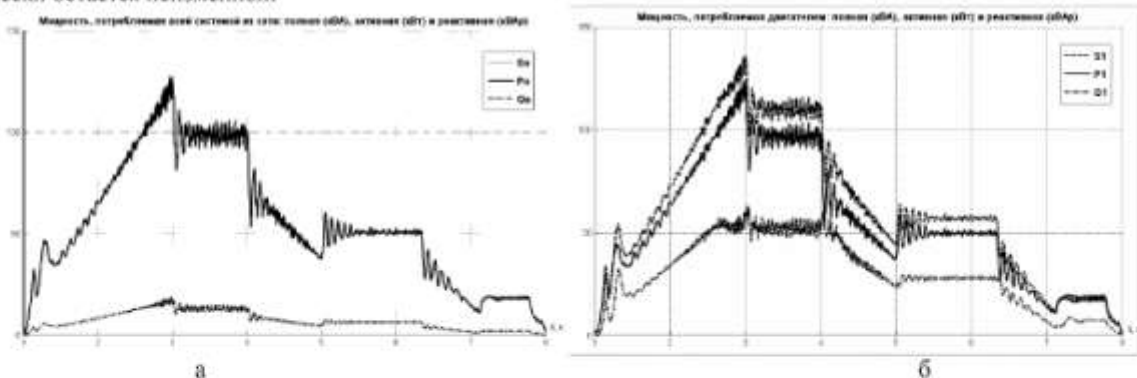


Рис. 3. Диаграммы полной мощности и ее составляющих: а – системы электропривода в целом, б – электродвигателя.

На рис.4 представлена динамика изменения таких важных энергетических показателей электропривода, как коэффициент мощности  $\cos\varphi$  и коэффициент полезного действия  $\eta$  в одних координатах для всей системы и для двигателя.

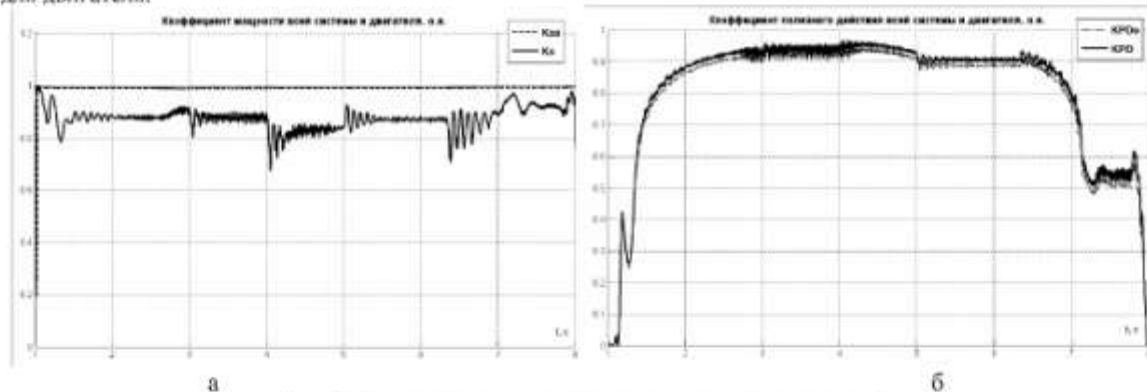


Рис. 4. Диаграммы изменения энергетических показателей: а – коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , б – коэффициента полезного действия  $\eta$ .

Диаграмма  $\cos\varphi = f(t)$  (рис. 4, а) подтверждает тот факт, что для системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода в целом характерно высокое значение коэффициента мощности во всем диапазоне регулирования (близок к единице). Для двигателя значение коэффициента несколько ниже и повышается при работе на малых скоростях, при этом средняя величина коэффициента мощности порядка 0,9.

Значения коэффициента полезного действия зависят от величины скорости (рис. 4, б). При небольшом диапазоне регулирования до 2:1 КПД достаточно высок (0,9 и более), а при расширении диапазона до 9:1 его значение существенно уменьшается (не более 0,6). На полученных диаграммах хорошо видно, что значения КПД

для всей системы несколько ниже, чем у двигателя. Это связано с потерями в дополнительных элементах статорной цепи (выпрямитель, инвертор и др.).

Размещение всех результатов вычислений в рабочем пространстве системы *MATLAB* с помощью блоков *To Workspace* позволяет достаточно удобно и быстро получать графические зависимости между необходимыми контролируемыми переменными в любом их сочетании. Так, на рис. 5 представлены фазовые траектории энергетических характеристик системы электропривода в целом (рис. 5, а) и для двигателя в отдельности (рис. 5, б).

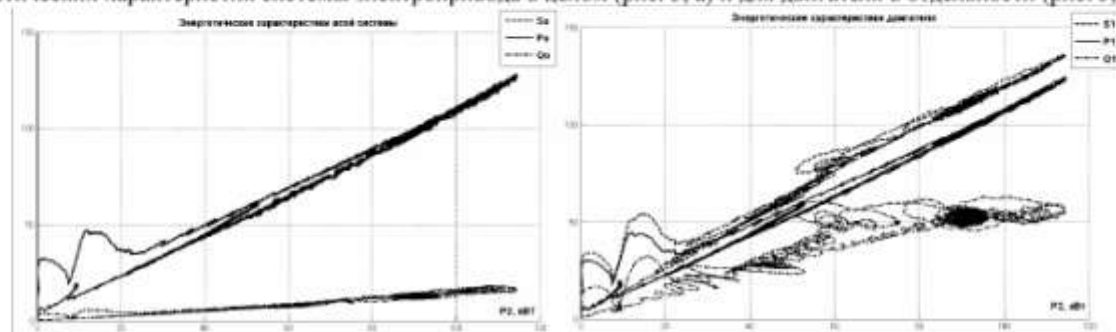


Рис. 5. Фазовые траектории энергетических характеристик: а – для системы электропривода в целом, б – для электродвигателя.

Типичным для всех характеристик является наличие петли, что соответствует двум разным режимам работы электропривода: запуску и торможению.

Следует отметить в общем их линейный характер, что подтверждает теоретические расчеты при проектировании электродвигателей.

Для количественного определения значений контролируемых переменных и энергетических показателей наиболее просто и удобно использовать блоки цифровой индикации *Display* пакета *Simulink*, входы которых подключаются к соответствующим линиям связи (находятся внутри подсистем *BE1* и *BE2*). При этом необходимо останавливать процесс моделирования в требуемый момент времени (использовать кнопку “пауза” на панели инструментов) и записывать показания.

В табл. 1 приведены результаты измерений для моментов времени, соответствующих срединам участков движения с установившейся скоростью в соответствии с рассматриваемой скоростной диаграммой с учетом расширения второго диапазона от  $\omega_{\min} / 2$  до  $\omega_{\max} / 3$ .

В заключение следует отметить, что применение виртуальных моделей для исследования сложных электромеханических систем целесообразно и эффективно, так как позволяет провести всесторонний анализ практически любой системы электропривода не только с точки зрения поведения системы в целом, но и по отношению к отдельным элементам, входящим в ее структуру. При этом имеется возможность моделирования процессов, соответствующих реальным электрическим сетям и электротехническим устройствам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно імпульсною модуляцією: Монографія, - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 470с.
2. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла, Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет), 2002. – 43с.
3. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. Исследование динамики и энергетических показателей электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки) Тематический выпуск. – 2007. – С. 193 – 198.
4. Чермалых А.В. Исследование динамики и энергетических характеристик систем электропривода с помощью виртуальных моделей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – Вип. 4/2005 (33). – С. 142 – 147.
5. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2002. – 304 с., ил.
6. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с., ил.
7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *MATLAB 6.0*: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.

Таблица 1.

Угловая скорость	Система электропривода в целом					
	P2 (кВт)	P0 (кВт)	Q0 (кВАр)	S0 (кВА)	cosφ <sub>0</sub> (о.е.)	η <sub>0</sub> (о.е.)
$\omega_{\max}$	91,3	98,8	13,1	99,7	0,991	0,924
$\omega_{\max} / 3$	29,8	35,5	4,23	35,7	0,993	0,836
$\omega_{\max} / 9$	9,40	18,1	2,00	18,2	0,994	0,519
Угловая скорость	Электродвигатель					
	P1 (кВт)	P0 (кВт)	Q1 (кВАр)	S1 (кВА)	cosφ (о.е.)	η (%)
$\omega_{\max}$	91,3	97,0	52,6	110,4	0,878	0,941
$\omega_{\max} / 3$	29,8	34,6	18,3	39,20	0,883	0,859
$\omega_{\max} / 9$	9,40	17,2	7,00	18,60	0,926	0,546