

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра электротехники и электроэнергетики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД»

Составители:
В.И. АФОНИН
Р.В. РОДИОНОВ
С.А. СБИТНЕВ

Владимир 2009

УДК 62-83
ББК 31.291
М54

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент
Владимирского государственного университета
В.С. Грибакин

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Методические указания к расчетно-лабораторным работам по
М54 дисциплине «Электрический привод» / сост.: В. И. Афонин, Р. В. Родионов, С. А. Сбитнев; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 38 с.

Содержат описание четырех расчетно-лабораторных работ. При их постановке обобщен опыт ранее изданных кафедрой электротехники ВлГУ методических руководств по смежным дисциплинам, а также учтен опыт работы в этом направлении ведущих вузов страны.

Структурно выделены этапы подготовки (общие положения и предварительный расчет), выполнения (экспериментальная часть) и расчета (обработка экспериментальных данных и построения функциональных зависимостей). Каждая работа содержит вопросы для самопроверки, методические указания с пояснениями и расчетными формулами, в конце приведен библиографический список.

Предназначены для студентов дневного и заочного обучения электрических и электроэнергетических специальностей «Электроснабжение» (140211), «Энергомашиностроение» (140500).

Ил. 36. Библиогр.: 8 назв.

УДК 62-83
ББК 31.291

Организация и порядок выполнения расчетно-лабораторных работ

При выполнении лабораторных работ студенты приобретают навыки моделирования электрических машин и электрических приводов, учатся составлять соответствующие математическим моделям структурные схемы, обрабатывать результаты моделирования.

Лабораторные работы выполняются бригадами из 2-3 студентов. В день выполнения работы каждая бригада должна иметь одну заготовку чистового отчета с письменными ответами в соответствии с требованиями раздела «Выполнение работы» к каждой лабораторной работе со всеми необходимыми рисунками, графиками и таблицами.

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием названия университета, кафедры, учебной группы, фамилии, имени, отчества, названия, номера и даты выполнения работы;
- задания;
- структурную схему;
- расчетные формулы с необходимыми вычислениями;
- таблицы, графики и диаграммы, полученные в результате моделирования;
- обработку результатов моделирования с выводами.

Расчетно-лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: построение моделей, изучение и сравнение характеристик двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым, параллельным и последовательным возбуждением.

Построение модели и получение характеристик ДПТ производится в среде MATLAB пакетом SIMULINK.

Выполнение работы

1. Построение модели и изучение характеристик ДПТ с независимым возбуждением

ДПТ можно представить в виде математической модели, описывае-

мой набором уравнений [2, 3, 8]. В частности, для ДПТ с независимым возбуждением (рис. 1) уравнения имеют вид:

$$U_B = L_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B, \quad U_{Я} = L_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + r_{Я} i_{Я} + e_{Я}, \quad J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \quad (1)$$

$$\Phi_B = k_{\Phi} i_B, \quad e_{Я} = k_E \omega_m \Phi_B, \quad M = k_m i_{Я} \Phi_B,$$

где индексом «В» отмечены переменные и параметры, относящиеся к обмотке возбуждения, индексом «Я» отмечены переменные и параметры, относящиеся к якорю, коэффициенты k_{Φ} , k_E и k_m – конструктивные постоянные.

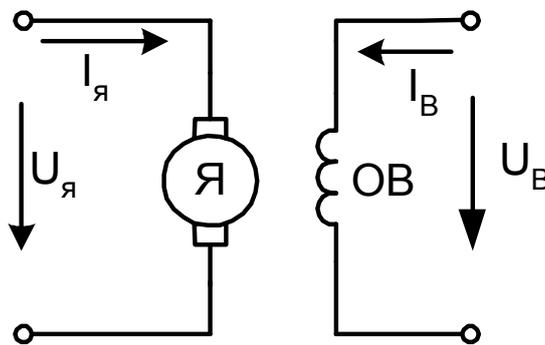


Рис. 1. ДПТ с независимым возбуждением

С помощью операторных преобразований приводим уравнения (1) к следующему виду:

$$\bar{u}_B = (sT_B + 1)\bar{i}_B, \quad \bar{u}_{Я} = (sT_{Я} + 1)\bar{i}_{Я} + \bar{\Phi}_B \bar{\omega}_m, \quad (2)$$

$$sT_m \bar{\omega}_m = \bar{\Phi}_B \bar{i}_{Я} - \bar{M}_H, \quad \bar{\Phi}_B = k_{\Phi} \bar{i}_B,$$

Используя данные уравнения, можно построить модель, представленную на рис. 2.

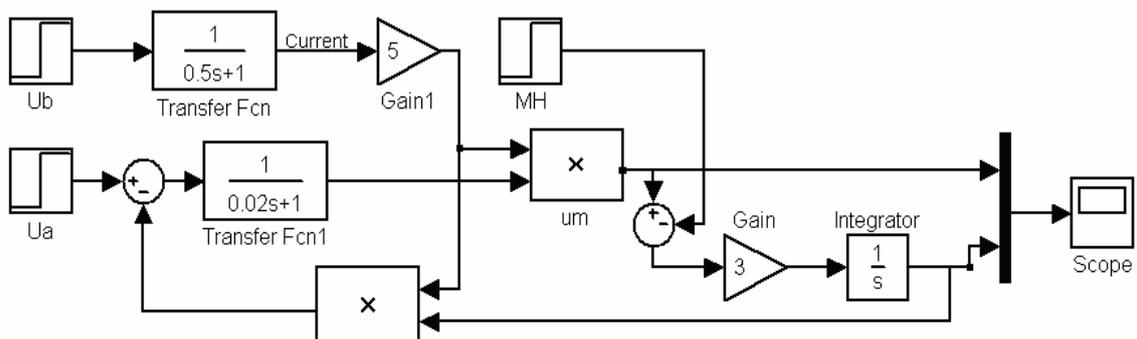


Рис. 2. Модель ДПТ с независимым возбуждением

Результаты моделирования представлены на рис. 3

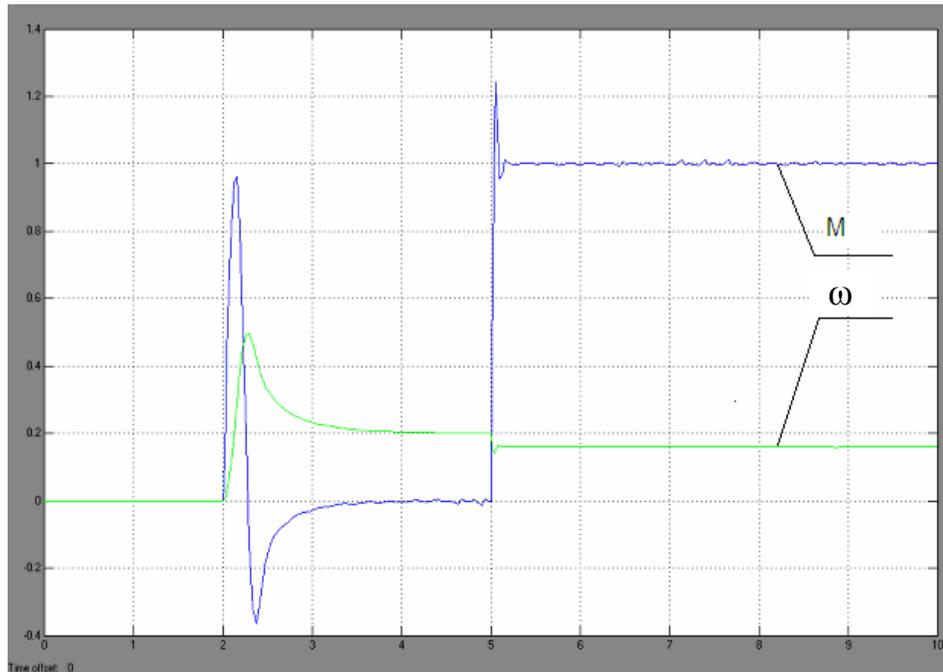


Рис. 3. Результаты моделирования ДПТ с независимым возбуждением

2. Построение модели и изучение характеристик ДПТ с параллельным возбуждением

В ДПТ с параллельным возбуждением обмотка возбуждения включена параллельно якорю (рис. 4) .

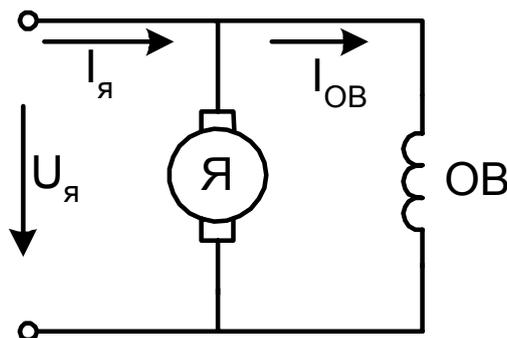


Рис. 4. ДПТ с параллельным возбуждением

В этом случае $\bar{u}_B = \bar{u}_я = \bar{u}$ и из формул (2) имеем

$$\bar{u} = (sT_B + 1)\bar{i}_B, \quad \bar{u} = (sT_я + 1)\bar{i}_я + \bar{\Phi}_B \bar{\omega}_m,$$

$$sT_m \bar{\omega}_m = \bar{\Phi}_B \bar{i}_я - \bar{M}_H, \quad \bar{\Phi}_B = k_\Phi \bar{i}_B.$$

Используя данные уравнения, можно построить модель, представленную на рис. 5. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

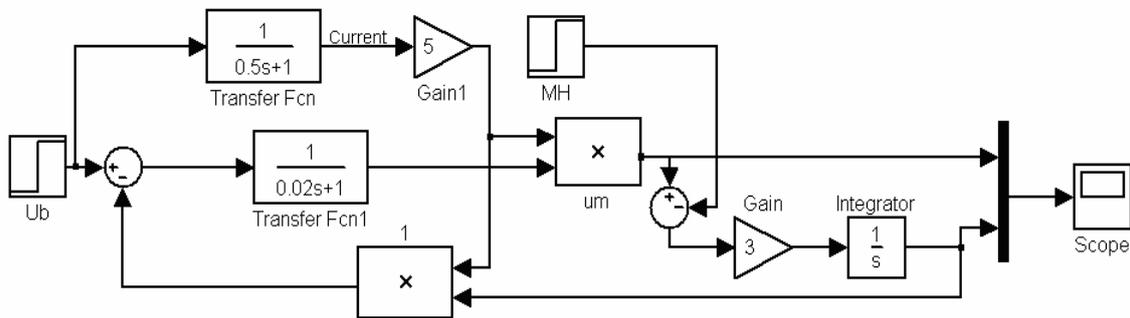


Рис. 5. Модель ДПТ с параллельным возбуждением

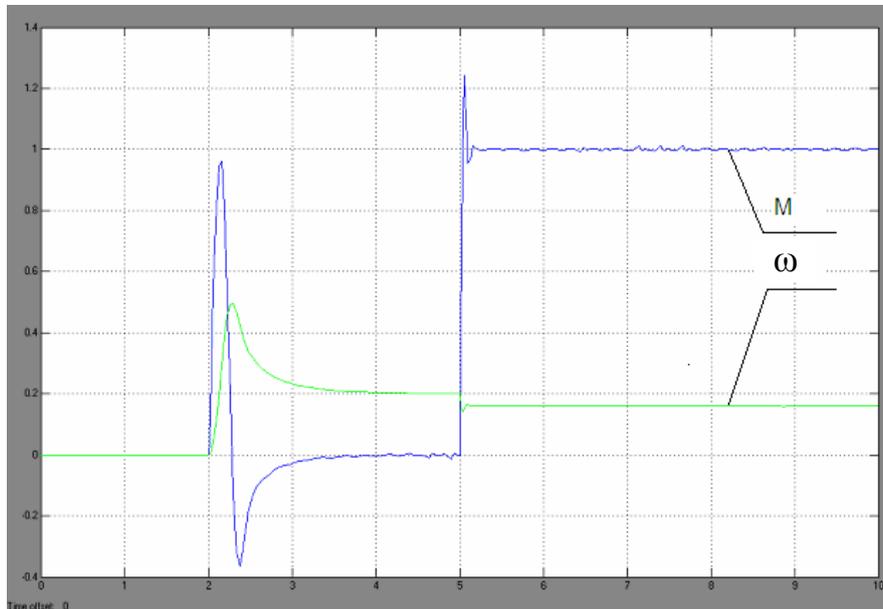


Рис. 6. Результаты моделирования ДПТ с параллельным возбуждением

3. Построение модели и изучение характеристик ДПТ с последовательным возбуждением

ДПТ с последовательным возбуждением схематически показан на рис. 7.

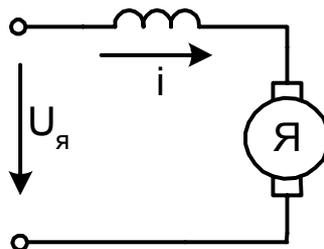


Рис. 7. ДПТ с последовательным возбуждением

Уравнения, описывающие работу двигателя, имеют вид:

$$u = (L_{\text{Я}} + L_{\text{В}}) \frac{di}{dt} + (r_{\text{В}} + r_{\text{Я}})i + e_{\text{Я}}, \quad J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_{\text{Н}},$$

$$\Phi_{\text{В}} = k_{\Phi} i, \quad e_{\text{Я}} = k_{\text{Е}} \omega_m \Phi_{\text{В}}, \quad M = k_m i_{\text{Я}} \Phi_{\text{В}}.$$

В операторном виде уравнения (5) имеют следующий вид:

$$\bar{u} = (sT + 1)\bar{i}_{\text{В}} + k_I \bar{i} \bar{\omega}_m, \quad sT_m \bar{\omega}_m = k_I \bar{i}^2 - \bar{M}_{\text{Н}}.$$

Используя данные уравнений, можно построить модель, изображенную на рис. 8. Результаты моделирования представлены на рис. 9.

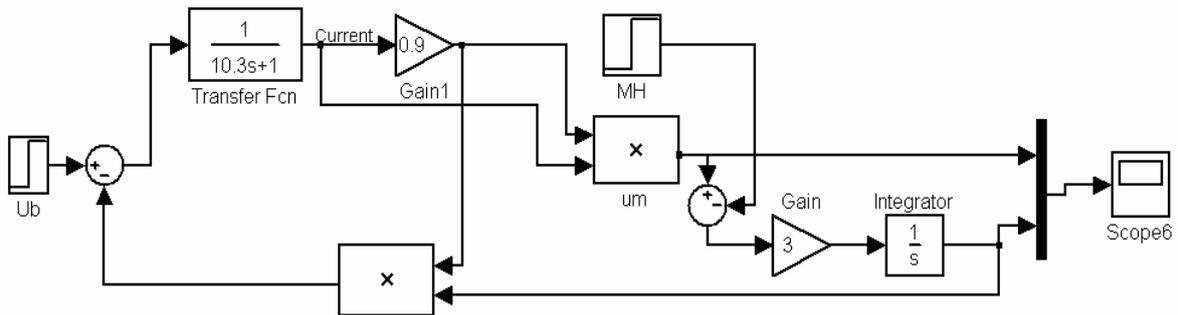


Рис. 8. Модель ДПТ с последовательным возбуждением

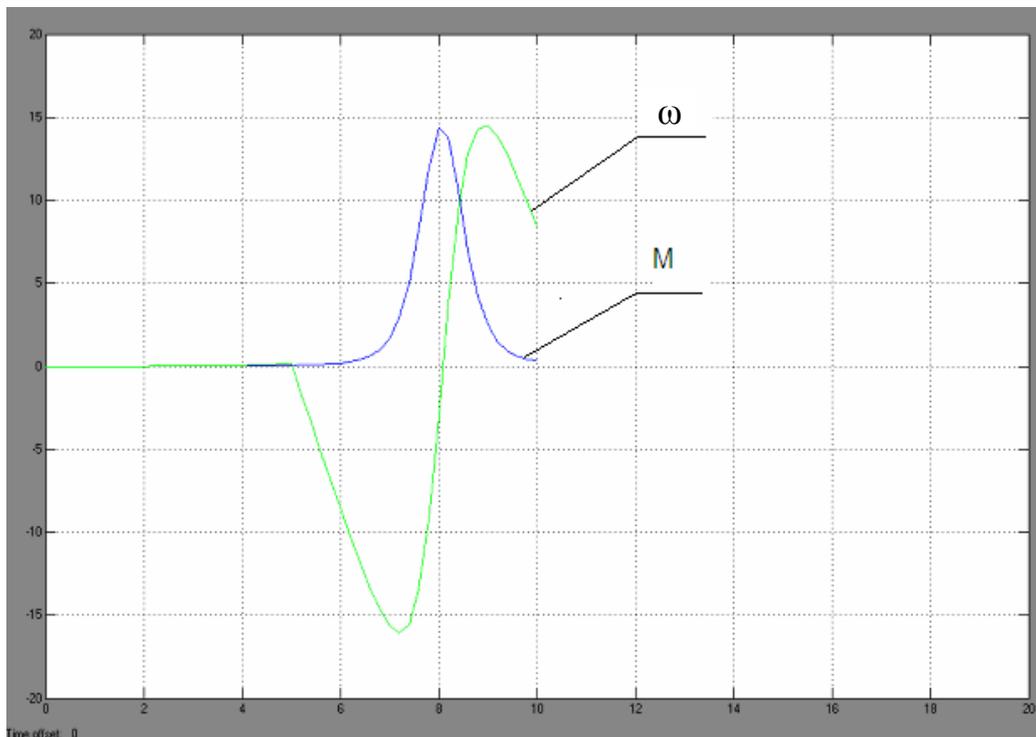


Рис. 9. Результаты моделирования ДПТ с последовательным возбуждением

Рабочее задание

1. Провести моделирование:

а) для ДПТ с независимым возбуждением при следующих значениях:

$$[M = M_H; U_{\text{я}} = U_{\text{яН}}; U_{\text{в}} = U_{\text{вН}}],$$

$$[M = 0; U_{\text{я}} = U_{\text{яН}}; U_{\text{в}} = U_{\text{вН}}],$$

$$[M = M_H; U_{\text{я}} = U_{\text{яН}}; U_{\text{в}} = 0,9 \cdot U_{\text{вН}}],$$

$$[M = M_H; U_{\text{я}} = 0,5 \cdot U_{\text{яН}}; U_{\text{в}} = U_{\text{вН}}],$$

б) для ДПТ с параллельным возбуждением при следующих значениях:

$$[M = M_H; U_{\text{я}} = U_{\text{в}} = U_{\text{Н}}],$$

$$[M = 0; U_{\text{я}} = U_{\text{в}} = U_{\text{Н}}],$$

$$[M = 0,5 \cdot M_H; U_{\text{я}} = U_{\text{в}} = U_{\text{Н}}],$$

в) для ДПТ с последовательным возбуждением при следующих значениях:

$$[M = M_H; U_{\text{я}} = U_{\text{Н}}],$$

$$[M = 0; U_{\text{я}} = U_{\text{Н}}],$$

$$[M = 0,5 \cdot M_H; U_{\text{я}} = U_{\text{Н}}],$$

$$[M = M_H; U_{\text{я}} = 0,5 \cdot U_{\text{Н}}].$$

2. Обработка результатов моделирования:

а) определить время переходного процесса;

б) определить максимальные значения вращающего момента и частоты вращения в переходном процессе;

в) для стационарного режима определить значения частоты вращения, момента, мощности.

Результаты свести в таблицы.

Методические указания

В соответствии с заданием из табл.1 прил. 1 выбираются основные параметры машины постоянного тока (напряжение якоря, ток якоря, мощность, напряжение возбуждения, ток возбуждения, магнитный поток).

Номинальный момент рассчитывается

$$M_H = \frac{P_2 \cdot 10^3}{0,1047 \cdot n},$$

где P_2 - номинальная мощность, кВт;

n - частота вращения, мин⁻¹.

Для системы (1) рассчитываются постоянные коэффициенты

$$k_{\Phi} = \frac{\Phi_{\text{в}}}{i_{\text{в}}},$$

$$k_m = \frac{M}{\Phi_{\text{в}} \cdot i_{\text{я}}}.$$

По обмоточным данным двигателей из табл. 2 прил. 1 в соответствии с типом двигателя выбираются активные сопротивления якоря и обмотки возбуждения, а также по обмоточным данным рассчитываются индуктивности якоря и обмотки возбуждения

$$L_B = 1,2 \cdot p \cdot w_B \left(\frac{\Phi}{i_B} \right),$$
$$L_{\text{я}} = 0,144 \frac{w_{\text{я}}^2 \cdot I_{\text{я}} \cdot D_{\text{я}}}{\delta},$$

$w_{\text{я}} = \frac{N}{8ap}$ - число витков обмотки якоря.

Постоянная времени обмотки возбуждения

$$T_B = \frac{L_B}{r_B}.$$

Постоянная времени для обмотки якоря

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}}}.$$

Контрольные вопросы и задания

1. По уравнениям (1) составьте эквивалентную схему цепи возбуждения.
2. По уравнениям (1) составьте эквивалентную схему цепи якоря.
3. Понятие математической модели.
4. Что называется нагрузкой электродвигателя?
5. Что произойдет с частотой вращения ДПТ с независимым возбуждением, если напряжение возбуждения уменьшится на 10 %?
6. Что произойдет с ДПТ независимого возбуждения при напряжении возбуждения, равном нулю, и напряжении якоря, равном номинальному?
7. Какова взаимосвязь между постоянной времени якоря ДПТ и временем переходного процесса?

Расчетно-лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ

Цель работы: изучение электропривода с асинхронным двигателем (АД) при векторном управлении [1, 4, 5, 7].

Общие положения

Одним из распространенных видов управления электроприводами переменного тока является векторное управление. Для его реализации используются микропроцессорные системы. Сигналы тока и частоты вращения обрабатываются такими системами с задержкой. Для имитации этой задержки в структурную схему введены звенья $1/z$. Модель двигателя реализована блоком SimpowerSystem, в который вводятся параметры схемы замещения АД и основные параметры двигателя. Вычисление переменных АД (токов, частоты вращения, вращающего момента, магнитного потока и т.д.) осуществляется по решению дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= r_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_s + j\omega \cdot \bar{\Psi}_s; \\ \bar{u}_r &= r_r \cdot \bar{i}_r + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_r + j(\omega - \omega_r) \bar{\Psi}_r; \\ M &= \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left[\bar{\Psi}_s^* \cdot \bar{i}_s \right]; \\ J \frac{d}{dt} \omega_r &= M \pm M_c; \\ \bar{\Psi}_s &= L_s \cdot \bar{i}_s + L_m \cdot \bar{i}_r; \\ \bar{\Psi}_r &= L_m \cdot \bar{i}_s + L_r \cdot \bar{i}_r, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где \bar{i} , $\bar{\Psi}$ и \bar{u} - мгновенные значения обобщенных пространственных векторов токов, потокосцеплений и напряжений, полученные из мгновенных значений соответствующих фазных величин;

r_s и r_r - активные сопротивления фазы статора и ротора;

L_s и L_r - индуктивности обмоток статора и ротора;

L_m - индуктивность контура намагничивания;

ω_r - угловая скорость ротора;

J и M_c - момент инерции электромеханической системы и момент сопротивления, приведенные к валу электродвигателя.

Питание двигателя осуществляется от инвертора напряжения, в качестве ключей применяются IGBT транзисторы с обратновключенными диодами. Прямое падение напряжения на транзисторе в открытом состоянии составляет 0,8-1,2 В; частота коммутации – от сотен герц до десятков

килогерц; прямое падение напряжения на обратновключенном диоде равно 0,8-1,2 В. Питание автономного инвертора напряжения (АИН) осуществляется от неуправляемого выпрямителя (в подавляющем большинстве случаев), поэтому напряжение звена постоянного тока

$$U_{DC} \approx \sqrt{2} \cdot U_{л}, \quad (4)$$

где $U_{л}$ - линейное напряжение на входе преобразователя частоты.

Управляется АИН регулятором тока. Обратная связь по току осуществляется после преобразования из трехфазной системы токов в систему координат d, q . Постоянство потока заданно в виде константы. Частота вращения регулируется пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятором).

Выполнение работы

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо по выбранным параметрам АД рассчитать параметры следующих блоков: вычислители магнитного потока и угла Θ , вычислители составляющих тока d, q . Ввести параметры АД и параметры АИН, задать напряжение звена постоянного тока и величину магнитного потока. Структурная схема при векторном управлении АД с постоянным магнитным потоком представлена на рис. 10.

Рабочее задание

1. Рассчитать параметры математической модели в соответствии с параметрами схемы замещения выбранного двигателя.

2. Провести моделирование:

а) подобрать параметры регулятора частоты вращения таким образом, чтобы значение момента M не превышало $2 \cdot M_H$ и время переходного процесса было минимально. Момент сопротивления M_C равен нулю;

б) при выбранном регуляторе частоты вращения получают графики (рис. 11 и 12) при следующих значениях момента сопротивления и момента инерции:

$[M_C = 0; J = J_{дв}]; [M_C = M_H; J = 1,5 \cdot J_{дв}]; [M_C = 0,5 \cdot M_H; J = 1,5 \cdot J_{дв}];$

$[M_C = M_H; J = 4 \cdot J_{дв}].$

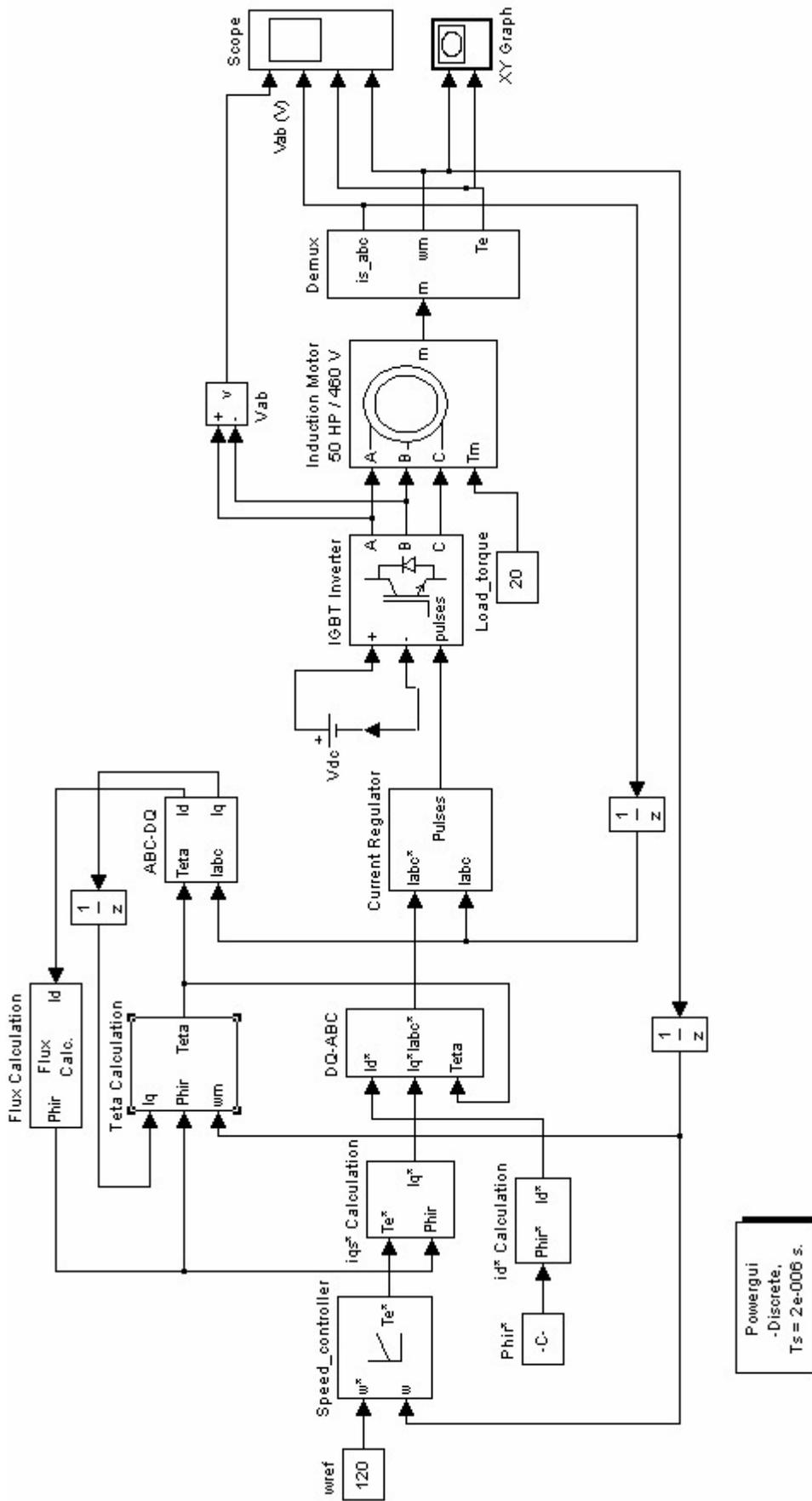


Рис. 10. Структурная схема электропривода при векторном управлении АД

3. Обработка результатов моделирования:

- а) определить амплитуду импульсов напряжения;
- б) найти максимальное значение момента (на графиках отмечают значения динамического и статического моментов);
- в) определить максимальное значение тока в переходном режиме;
- г) рассчитать амплитудное и действующее значения тока в стационарном режиме;
- д) определить время переходного процесса;
- е) найти время, в течение которого значение тока в переходном режиме было на 30 % больше тока в стационарном режиме;
- ж) вычислить значения момента, частоты вращения и мощности в стационарном режиме.

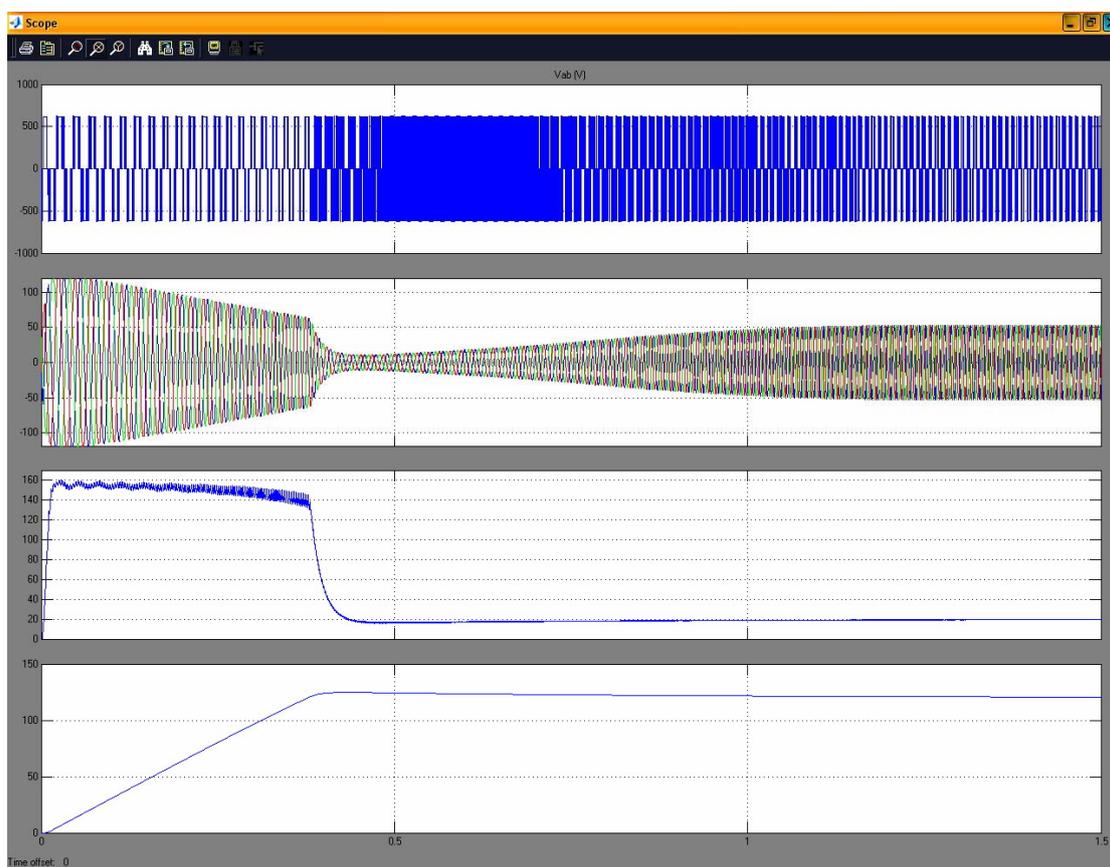


Рис. 11. Зависимости напряжения, токов, вращающего момента и частоты вращения от времени

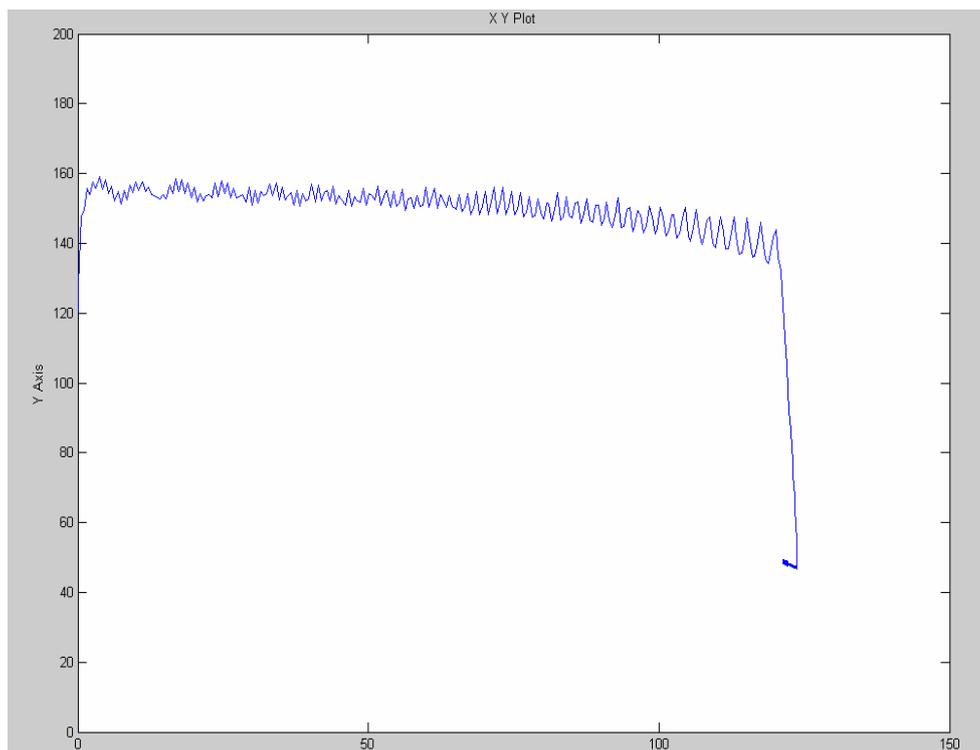


Рис. 12. Зависимость вращающего момента от частоты вращения
(частота вращения, рад/с, вращающий момент, Н·м)

Методические указания

Расчет параметров математической модели.

Параметры схемы замещения (прил. 2, 4) вводятся в диалоговое окно параметров двигателя. Напряжение звена постоянного тока устанавливается в соответствии с формулой (4). В блок задания частоты вращения вводится значение частоты вращения, рад/с,

$$\omega_{ref} = n_c \frac{\pi}{30}$$

В блок задания магнитного потока вводится значение магнитного потока, а блок вычисления составляющей тока d – значение, обратное значению взаимной индуктивности (рис. 13) и диалоговое окно (рис. 15).

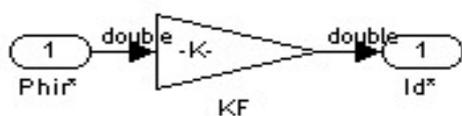


Рис. 13. Вычислитель тока I_d

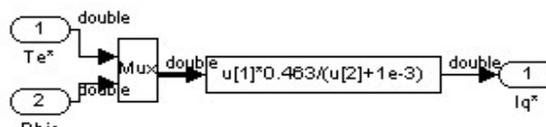


Рис. 14. Вычислитель тока I_q

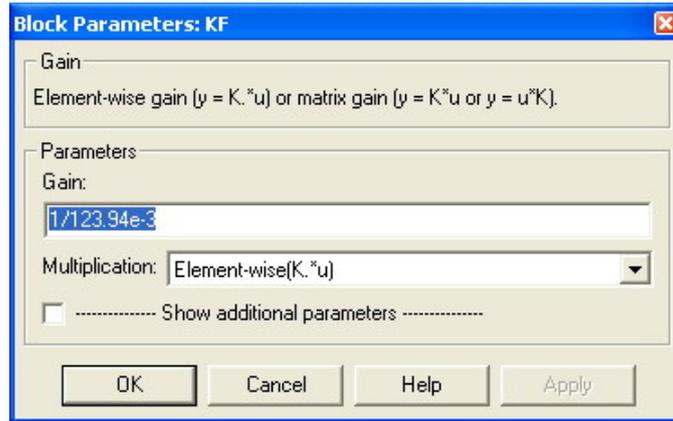


Рис. 15. Диалоговое окно вычислителя тока

В блоке вычисления составляющей q (рис. 14) находится составляющая тока I_q

$$I_q = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{L_r' + L_m}{L_m} \cdot \frac{M}{\Phi}$$

В блоке вычисления магнитного потока (рис. 16) вычисляется магнитный поток

$$\Phi = \frac{L_m \cdot I_d}{\left(1 + s \frac{L_r' + L_m}{r_r}\right)}$$

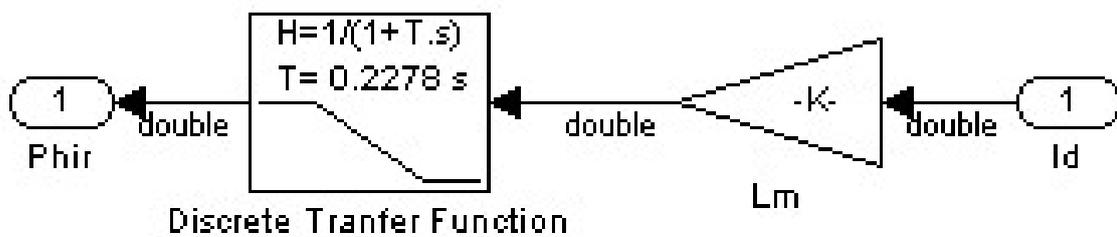


Рис. 16. Вычислитель магнитного потока

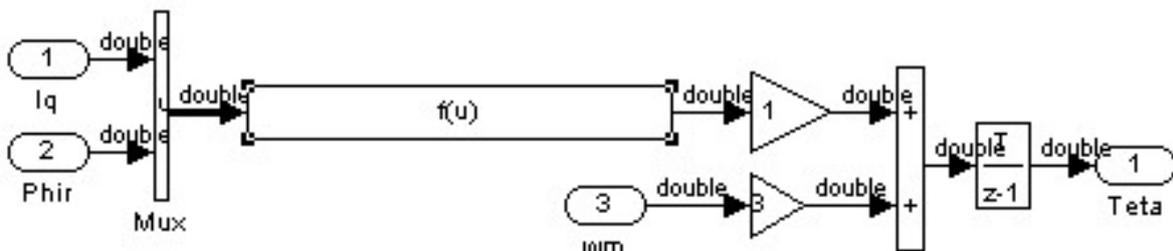


Рис. 17. Вычислитель угла Θ

Угол Θ рассчитывается блоком (рис. 17). Для вычисления угла находится частота вращения ротора

$$\omega_r = \frac{L_m \cdot I_d}{\left(\Phi \frac{L_r + L_m}{r_r} \right)}$$

Частота вращения приводится к числу пар полюсов.

Контрольные вопросы и задания

1. Составьте эквивалентную схему цепи статора и ротора по уравнениям (3).
2. В чем сущность векторного способа управления асинхронным двигателем (пояснить с использованием уравнений (3) и структурной схемы рис. 10)?
3. Назовите отличия векторного способа управления от частотного, параметрического.
4. Дайте определение статического момента.
5. Дайте определение динамического момента.
6. Основное уравнение электропривода.
7. Как зависит время переходного процесса от момента инерции и от момента сопротивления?

Расчетно-лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Цель работы: изучение электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) при питании от инвертора [2, 6, 8].

Общие положения

СДПМ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими видами двигателей (постоянного тока, асинхронным): меньшие массогабаритные показатели, широкий диапазон регулирования, лучшие энергетические показатели. Наибольшее распространение они получили в станочном приводе. Однако работать СДМ могут только в составе электропривода со сложной системой управления, обязательным элементом которой является датчик положения ротора или вычислитель положения ротора. Модель двигателя реализована блоком SimpowerSystem, в который вводятся параметры схемы замещения СДПМ и основные параметры двигателя (актив-

ное сопротивление обмотки статора, индуктивности по осям d, q , магнитный поток, число пар полюсов, момент инерции). Переменные СДПМ (токов, частоты вращения, вращающего момента, магнитного потока и т.д.) рассчитываются по решению дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} u_d - \frac{r}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \cdot \omega_r \cdot i_q; \\ \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} u_q - \frac{r}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \cdot \omega_r \cdot i_d - \frac{\lambda}{L_q} p \cdot \omega_r \\ M &= \frac{3}{2} p [\lambda \cdot i_q + (L_d - L_q) i_d \cdot i_q]; \\ J \frac{d}{dt} \omega_r &= M \pm M_c; \\ \frac{d\Theta}{dt} &= \omega_r, \end{aligned} \right\}$$

где i_d и i_q - ток статора по осям d и q ;

u_d и u_q - напряжения статора по осям d и q ;

r - активное сопротивление фазы статора;

L_d и L_q - индуктивности статора по осям d и q ;

p - число пар полюсов;

ω_r - угловая скорость ротора;

Θ - положение ротора;

λ - коэффициент, равный отношению ЭДС холостого хода к угловой скорости;

J и M_c - момент инерции электромеханической системы и момент сопротивления, приведенные к валу электродвигателя.

Двигатель питается от инвертора, в качестве ключей применяются IGBT транзисторы с обратновключенными диодами.

Прямое падение напряжения на транзисторе в открытом состоянии составляет 0,8-1,2 В; частота коммутации – от сотен герц до десятков килогерц; прямое падение напряжения на обратновключенном диоде составляет 0,8-1,2 В. В зависимости от напряжения, на которое рассчитан двигатель, вводятся параметры реле инвертора.

Инвертор управляется регулятором тока, где осуществляется преобразование из системы координат d, q в трехфазную систему токов. Частота вращения регулируется пропорционально-интегральным регулятором, в котором реализован метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

Выполнение работы

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо по выбранным параметрам СДПМ ввести параметры следующих блоков: блок двигателя, блок инвертора (параметры реле), задание частоты вращения и масштабирующих усилителей, включенных после измерителя (ввести число пар полюсов) (прил. 3). Структурная схема электропривода с СДПМ дана на рис. 18.

Рабочее задание

1. Рассчитать параметры математической модели в соответствии с параметрами схемы замещения выбранного двигателя.

2. Провести моделирование:

а) подобрать параметры регулятора частоты вращения таким образом, чтобы значение момента M не превышало $2 \cdot M_n$ и время переходного процесса было минимально. Момент сопротивления M_c принять равным нулю;

б) при выбранном регуляторе частоты вращения получить графики (рис. 19 - 21) при следующих значениях момента сопротивления и момента инерции: $[M_c = 0; J = J_{дв}]; [M_c = M_n; J = 1,5 \cdot J_{дв}]; [M_c = 0,5 \cdot M_n; J = 1,5 \cdot J_{дв}]$,

$[M_c = M_n; J = 4 \cdot J_{дв}]$.

3. Обработка результатов моделирования:

а) определить максимальное значение момента (на графиках отмечают значения динамического и статического моментов);

б) найти максимальное значение тока в переходном режиме;

в) определить амплитудное и действующее значение тока в стационарном режиме;

г) рассчитать время переходного процесса;

д) вычислить время, в течение которого значение тока в переходном режиме было на 30 % больше тока в стационарном режиме;

е) определить значения момента, частоты вращения и мощности в стационарном режиме.

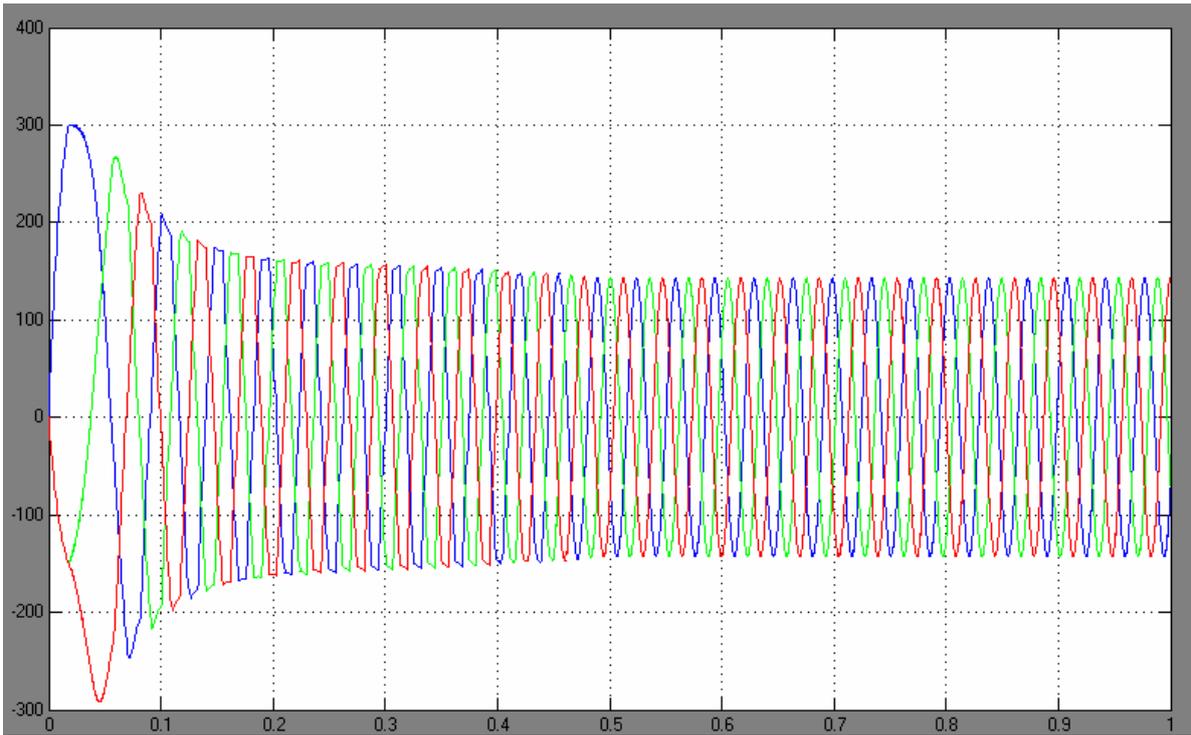


Рис. 19. Зависимости токов СДПМ в функции времени

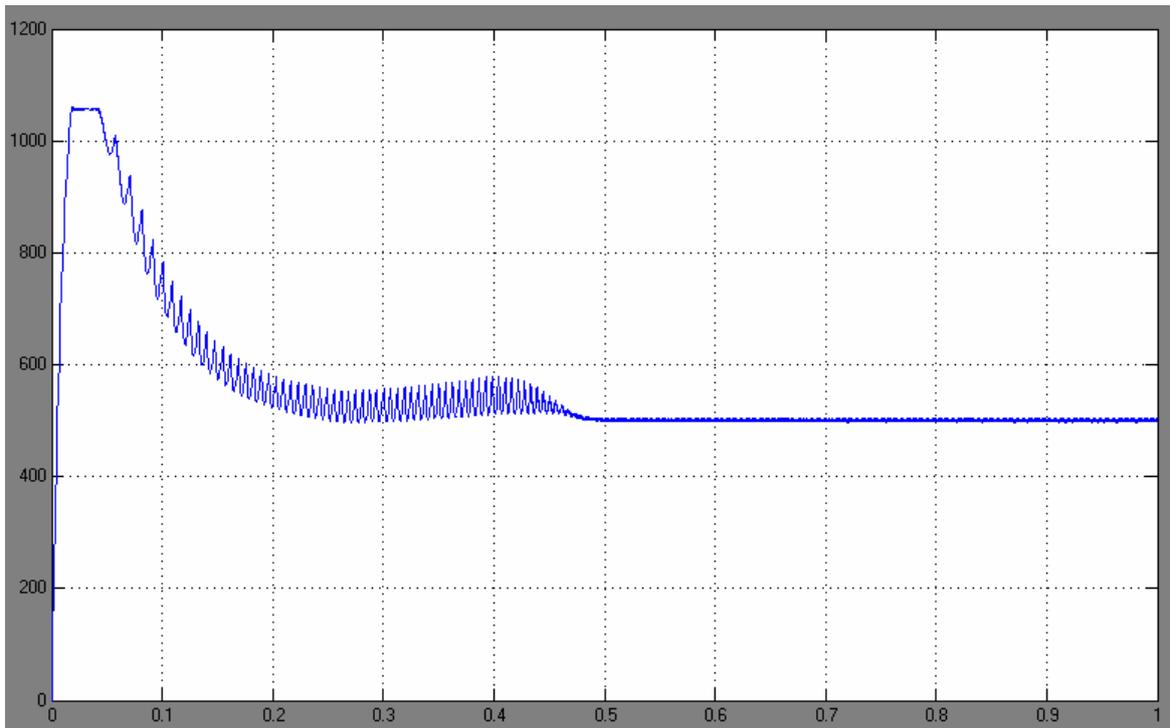


Рис. 20. Зависимость момента от времени

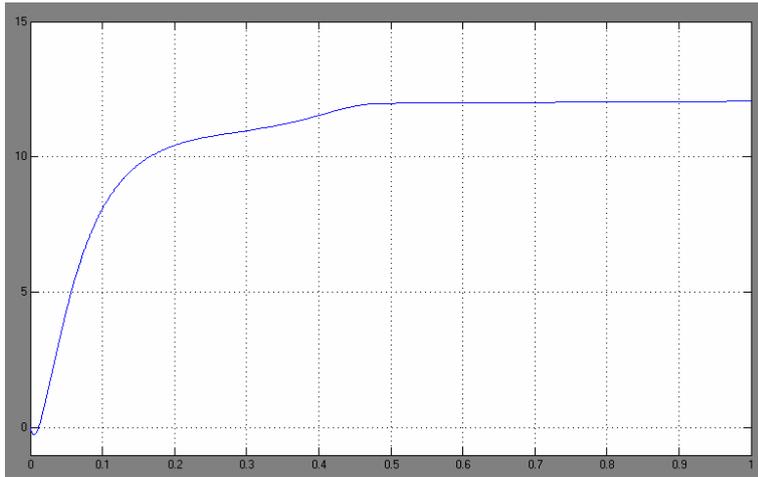


Рис. 21. Зависимость частоты вращения от времени, рад/с
пар полюсов вводятся в диалоговое окно (рис. 25, 26).

Методические указания

В соответствии с заданием ввести значения параметров схемы замещения СДПМ (прил. 3) в диалоговое окно (рис. 22). Параметры регулятора и значение частоты вращения вводятся в диалоговое окно (рис. 23, 24). Значения момента сопротивления и числа

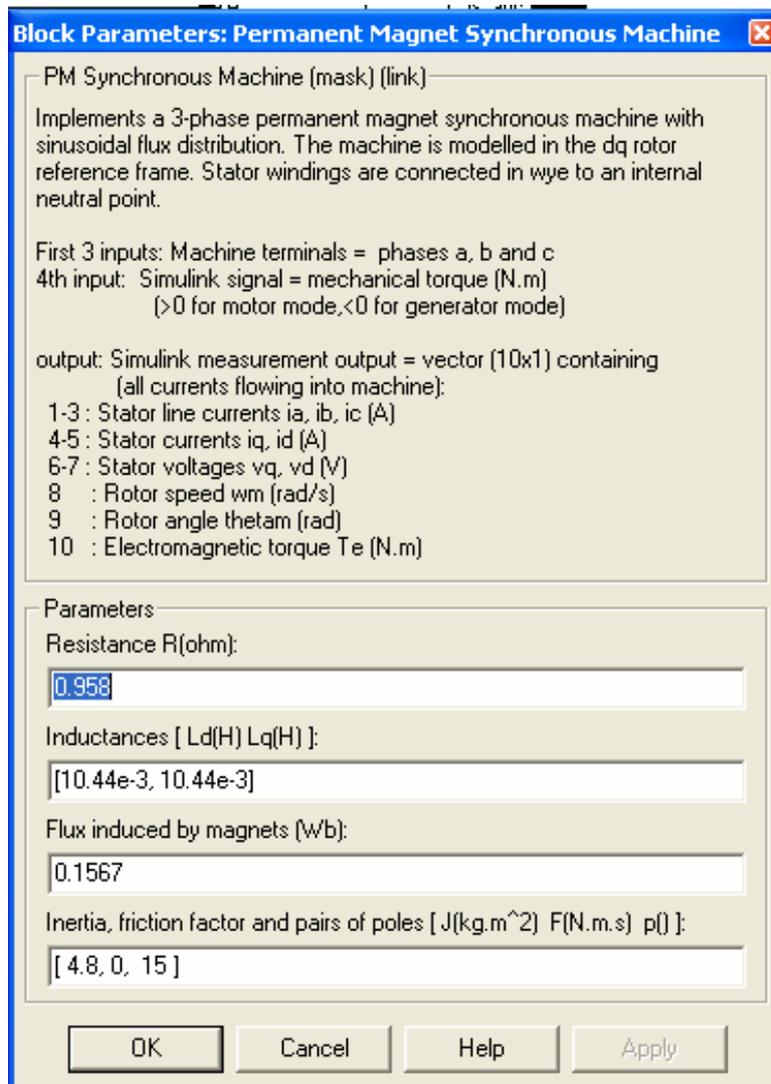


Рис. 22. Диалоговое окно параметров двигателя

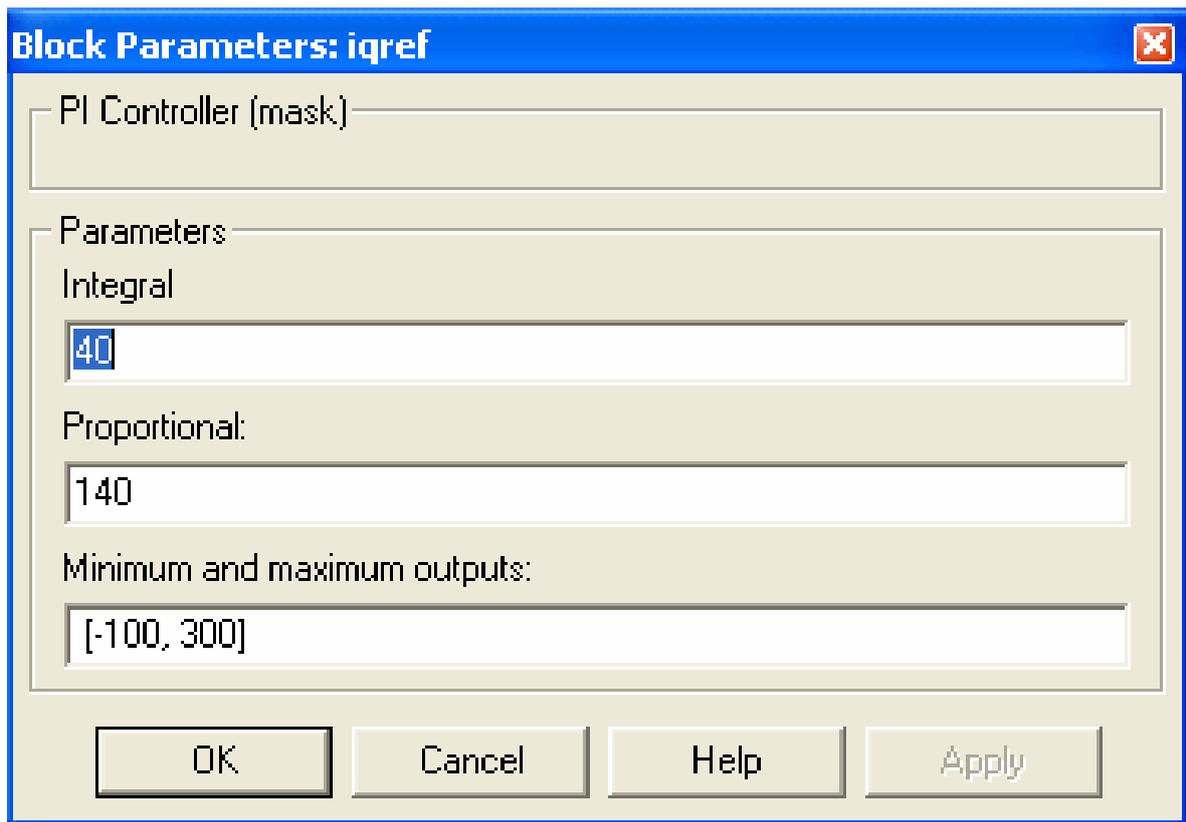


Рис. 23. Диалоговое окно параметров регулятора

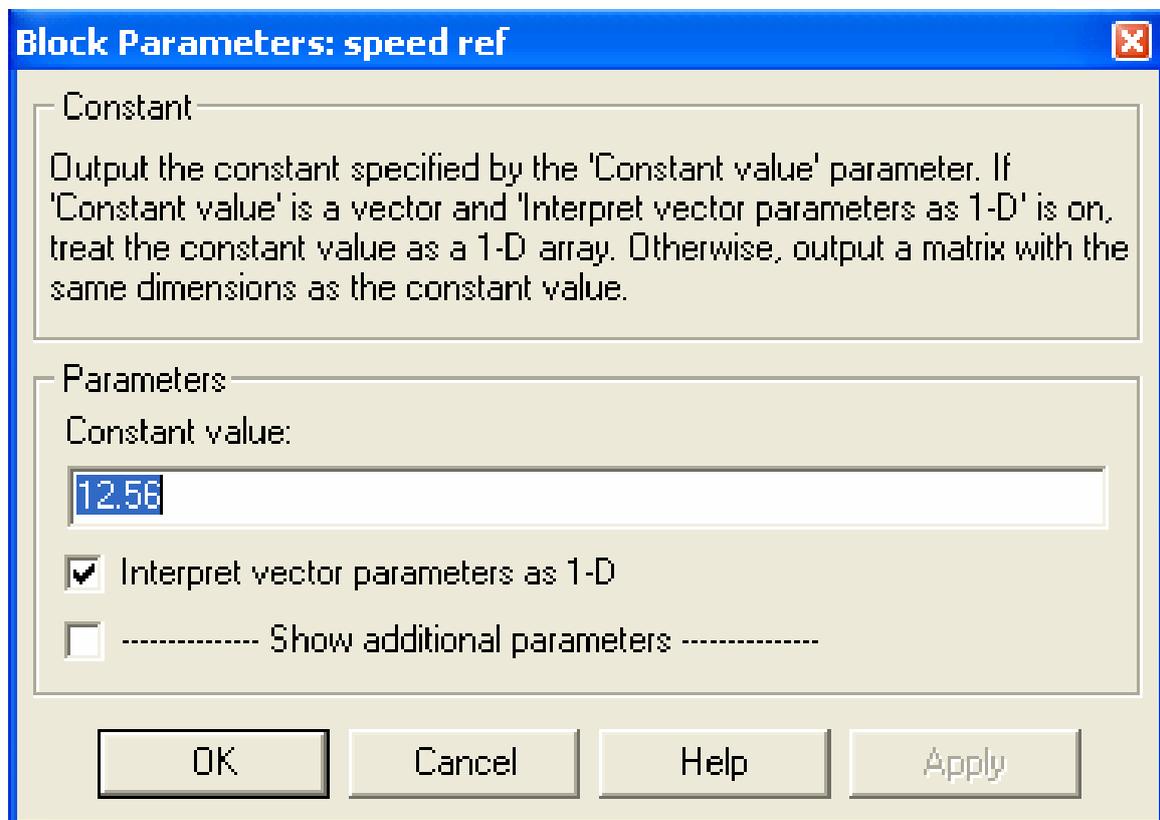


Рис. 24. Диалоговое окно задания частоты вращения

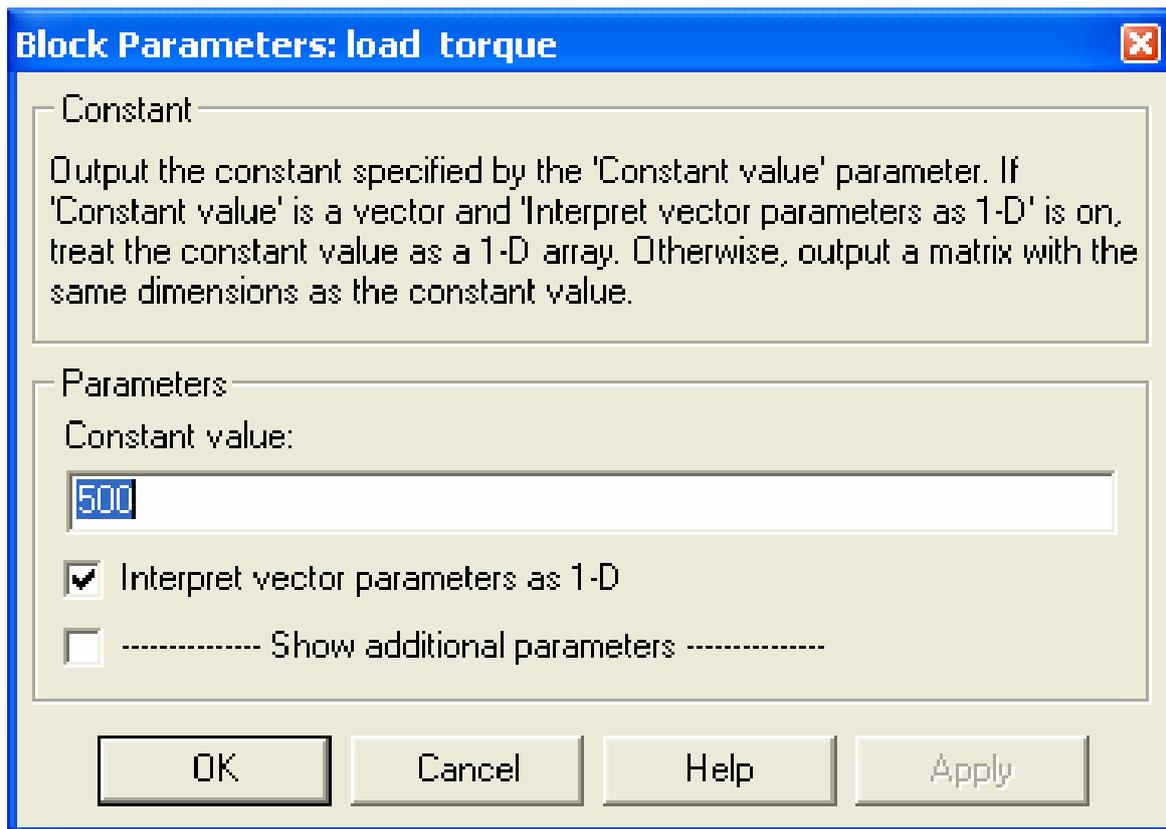


Рис. 25. Диалоговое окно задания момента нагрузки

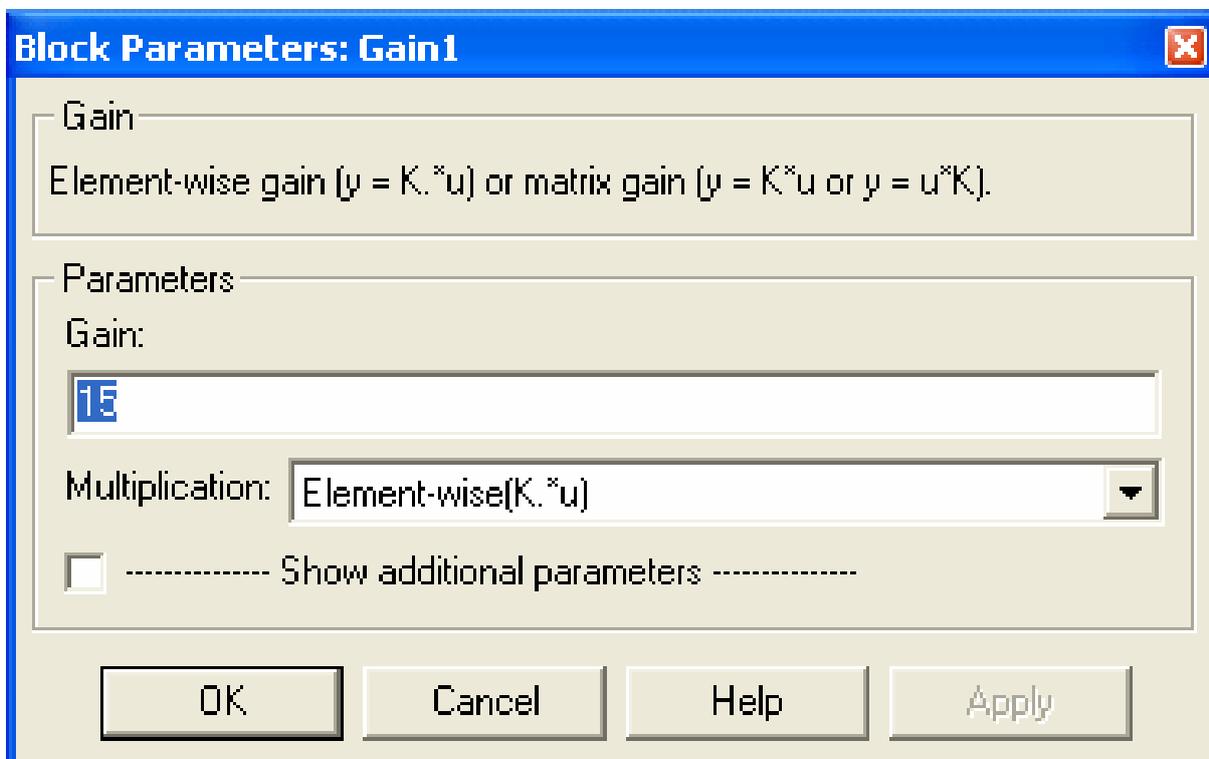


Рис. 26. Диалоговое окно числа пар полюсов

Контрольные вопросы и задания

1. Каковы конструкция и принцип действия синхронного двигателя с постоянными магнитами?
2. Состав электропривода с СДПМ.
3. Приведите примеры применения электроприводов с СДПМ.
4. За счет чего в СДПМ происходит реверс направления вращения?
5. Возможна ли работа электропривода с СДПМ без датчика положения ротора? Что выполняет функция датчика положения ротора в этом случае?
6. Чем отличается преобразователь частоты электропривода с СДПМ от электропривода с асинхронным двигателем (поясните с помощью структурных схем)?

Расчетно-лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Цель работы: изучение работы преобразователя частоты с трехуровневым инвертором напряжения [1, 2, 5, 7].

Общие положения

В современных регулируемых электроприводах переменного тока все чаще применяются полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ) с микропроцессорной системой управления. Для исследования работы силовой части преобразователя частоты в качестве нагрузки используется асинхронный двигатель. Входным блоком преобразователя служит неуправляемый выпрямитель, собранный на шести диодах. Выпрямленное напряжение подается в звено постоянного тока, представленное конденсатором и дросселем (дроссель в ряде случаев является опцией и чаще всего заменяется перемычкой). Выходным блоком является автономный инвертор напряжения, образованный шестью IGBT транзисторами и шестью обратновключенными диодами. Выходное напряжение формируется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), причем мгновенное напряжение принимает три значения $+U_{DC}$, 0 , $-U_{DC}$. Такие инверторы называются трехуровневыми. Регулирование напряжения осуществляется микропроцессорной системой управления. Электрическая схема силовой части ПЧ представлена на рис. 27. Выходное напряжение ПЧ характеризуется индексом модуляции: $k_{\text{мод}} = U_{\text{вых}} / U_{DC}$.

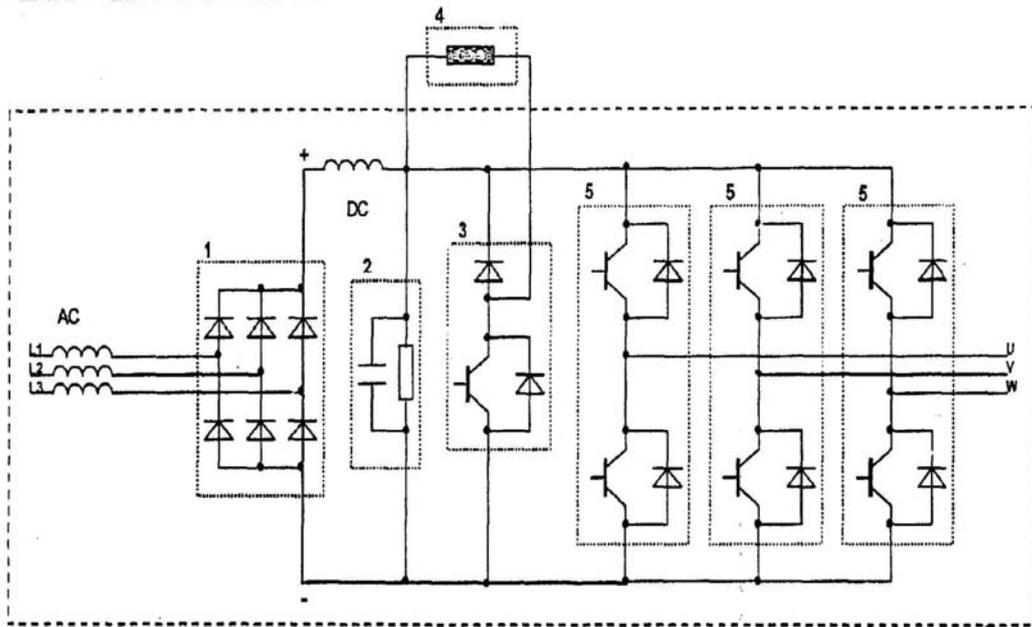


Рис. 27. Силовая часть ПЧ

На рис. 27 показаны трехфазный неуправляемый выпрямитель 1, звено постоянного тока 2, транзистор для обеспечения режима торможения с обратновключенным диодом 3, резистор для обеспечения режима торможения 4, автономный инвертор напряжения на основе IGBT-транзисторов с обратновключенными диодами 5. Кроме этого показаны сетевой дроссель AC и дроссель в звене постоянного тока DC, которые не являются обязательными элементами ПЧ. В качестве нагрузки преобразователя используем асинхронный двигатель.

Выполнение работы

Подготовка к лабораторной работе

Предметом изучения является преобразователь частоты с активно-индуктивной нагрузкой (асинхронным двигателем). В большинстве технических областях нашли применение преобразователи частоты, состоящие из неуправляемого выпрямителя, звена постоянного тока и автономного инвертора напряжения.

Структурная схема силовой части преобразователя частоты с активно-индуктивной нагрузкой (асинхронным двигателем) показана на рис. 28.

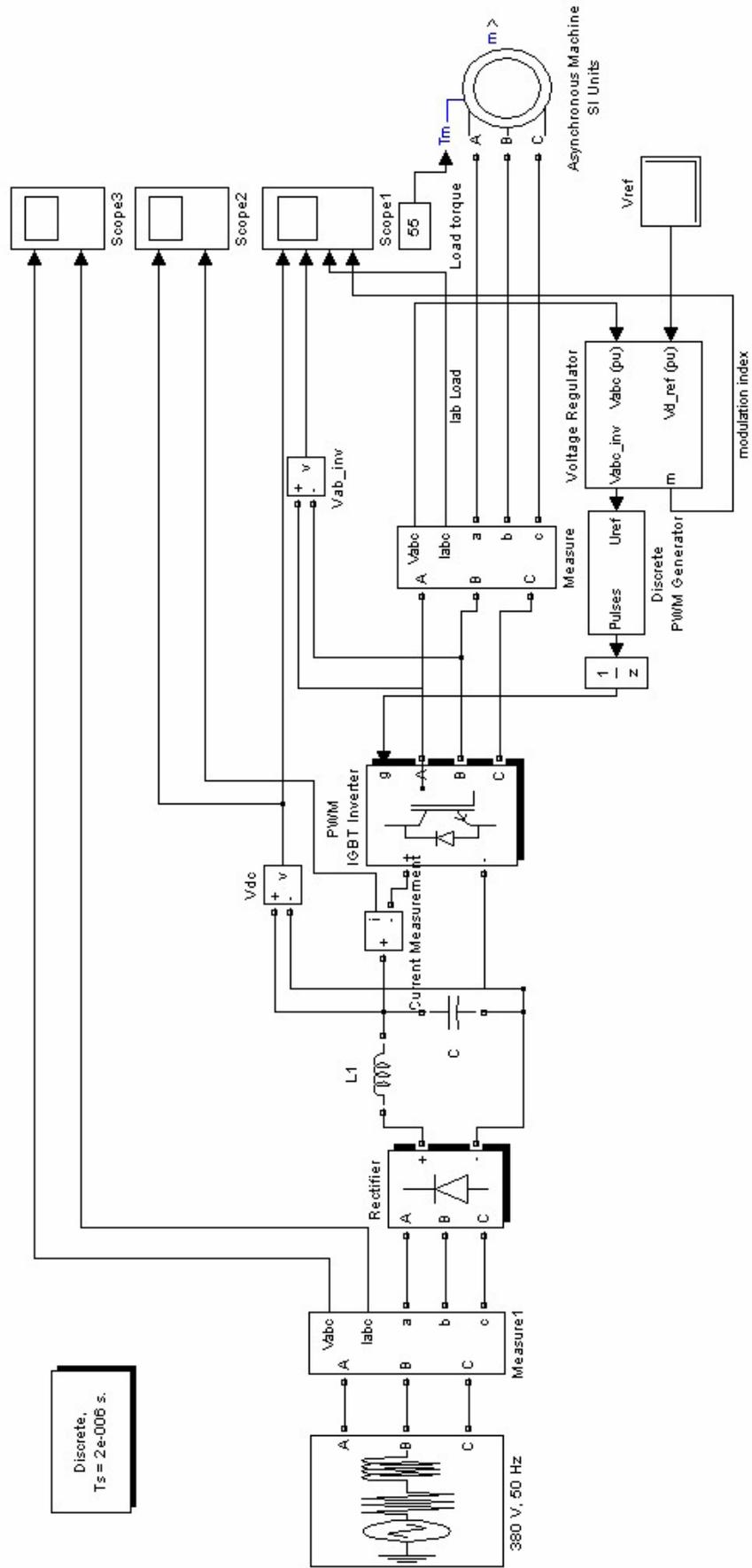


Рис. 28. Структурная схема силовой части преобразователя частоты в системе Simpowersystem

Рабочее задание

1. Провести моделирование:

а) подобрать параметры регулятора напряжения. При переходном процессе в звене постоянного тока задание выходного напряжения должно быть равно нулю (в начальный момент времени), а затем установлено в диапазоне от 0 до 1;

б) при выбранном регуляторе частоты вращения получают графики (рис. 29 - 31) при следующих значениях момента сопротивления: $M_C = 0$; $M_C = M_H$; $M_C = 0,5 \cdot M_H$.

2. Обработка результатов моделирования:

а) определить максимальный ток заряда звена постоянного тока;

б) рассчитать максимальное значение тока в переходном режиме;

в) найти амплитудное и действующее значения тока в стационарном режиме;

г) вычислить время переходного процесса;

д) определить время, в течение которого значение тока в переходном режиме было на 30 % больше значения тока в стационарном режиме

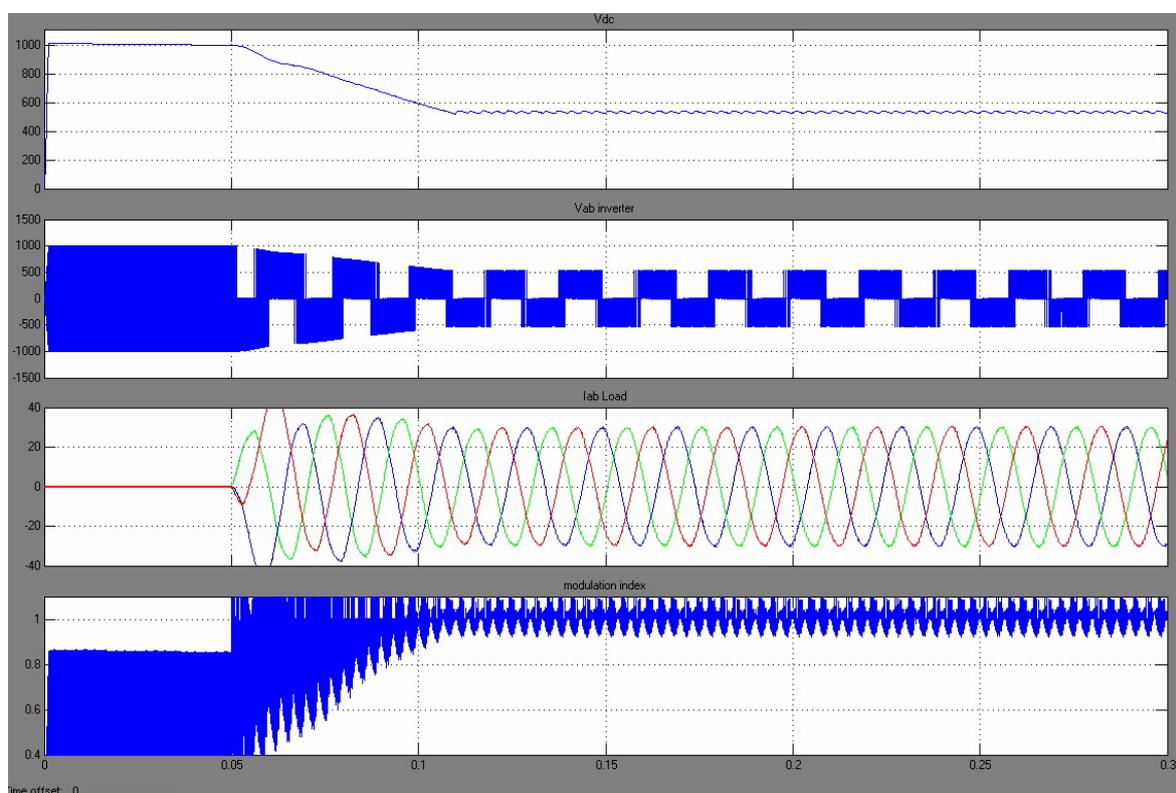


Рис. 29. Зависимости напряжения звена постоянного тока, выходного напряжения, токов, индекса модуляции

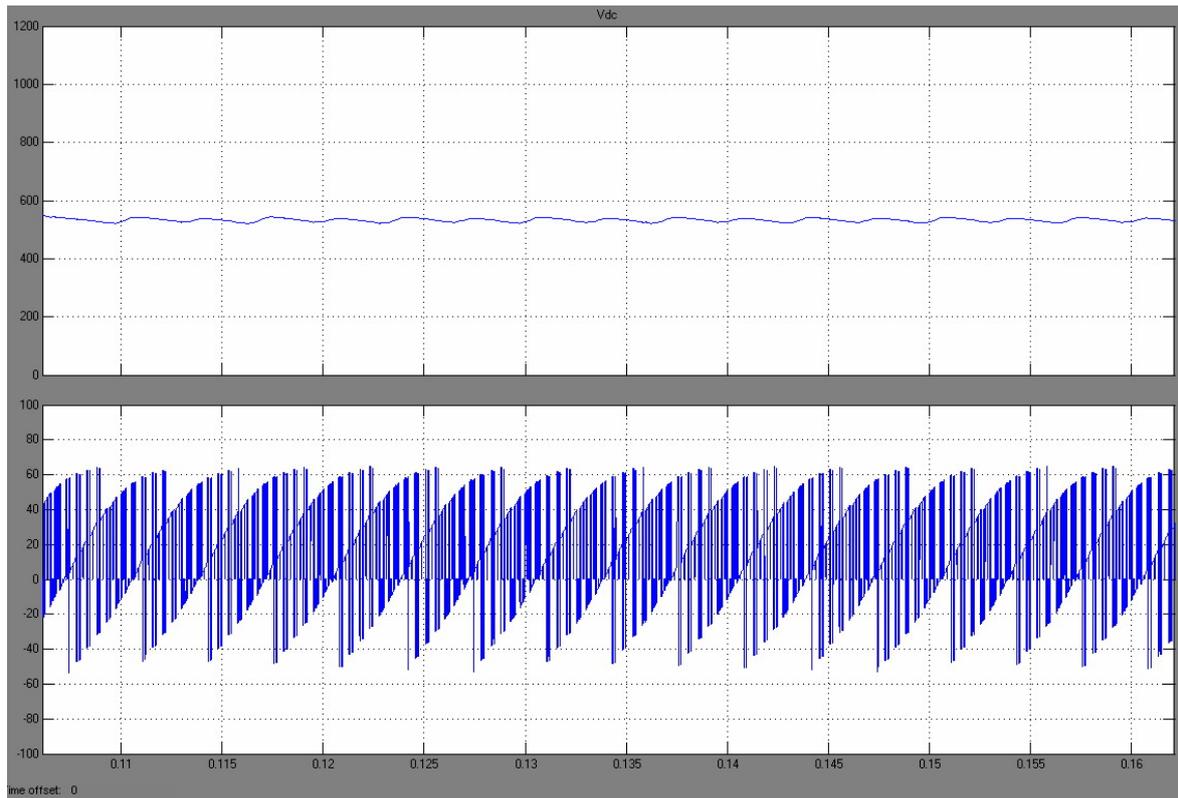


Рис. 30. Зависимости напряжения и тока звена постоянного тока

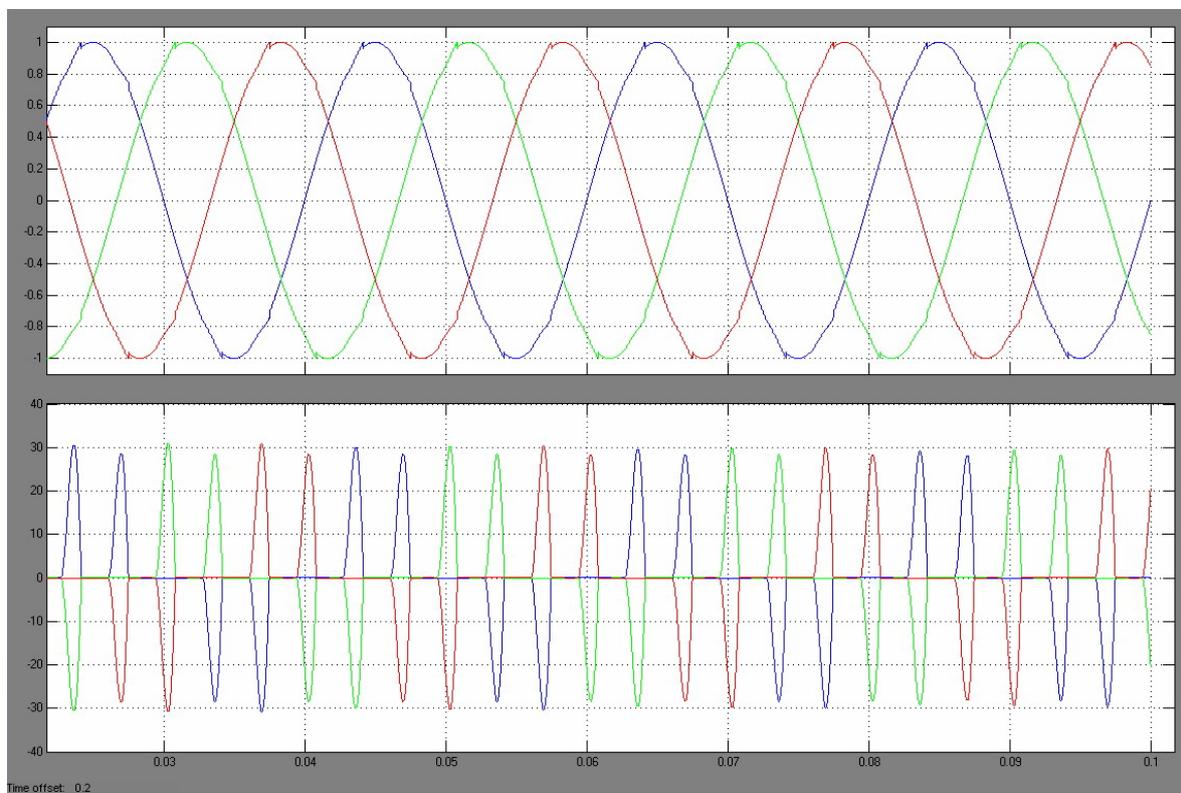


Рис. 31. Зависимости входных напряжений и токов преобразователя частоты

Методические указания

При подготовке к лабораторной работе необходимо внести в диалоговые окна параметры схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 32), выпрямителя (рис. 33), параметры звена постоянного тока С, параметры автономного инвертора напряжения (рис. 34), регулятора напряжения (рис. 35) и ШИМ-генератора (рис. 36) (см. прил. 2, 4).

Block Parameters: Asynchronous Machine pu Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. You can specify initial values for stator and rotor currents or for the stator current only.

Parameters

Preset model: No

Mechanical input: Torque T_m

Show detailed parameters

Rotor type: Squirrel-cage

Reference frame: Stationary

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [$P_n(\text{VA}), V_n(\text{V}_{\text{rms}}), f_n(\text{Hz})$]:
[7500 380 50]

Stator resistance and inductance [R_s, L_s] (pu):
[0.9975 0.00436]

Rotor resistance and inductance [R_r', L_r'] (pu):
[0.5671 0.00527]

Mutual inductance L_m (pu):
0.12394

Inertia constant, friction factor and pairs of poles [$H(\text{s}) F(\text{pu}) p()$]:
[0.6 0.05479 3]

Initial conditions
[1.0 0,0,0 0,0,0]

Simulate saturation

OK Cancel Help Apply

Рис. 32. Диалоговое окно параметров двигателя

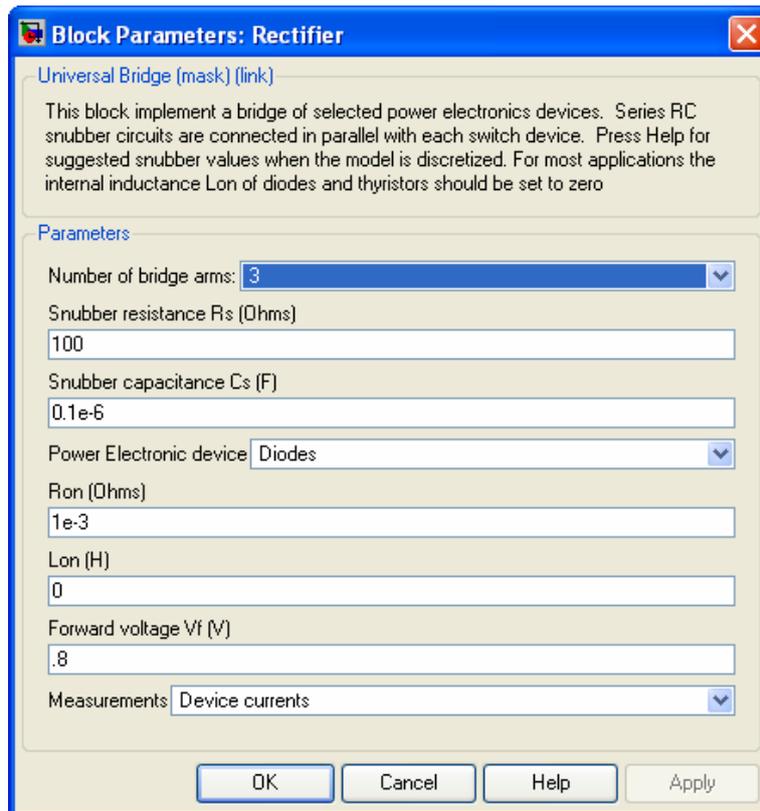


Рис. 33. Диалоговое окно параметров выпрямителя

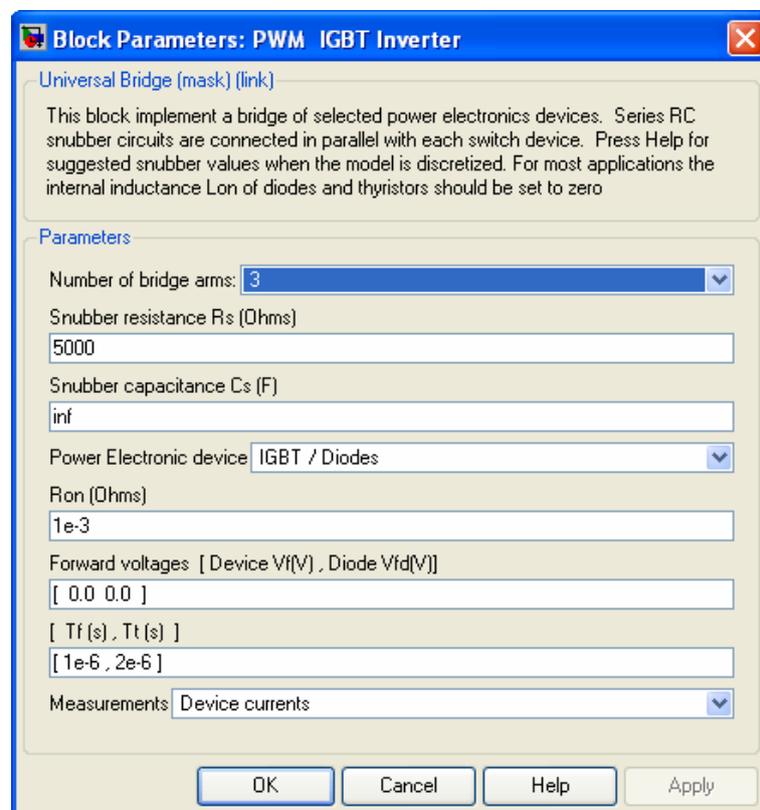


Рис. 34. Диалоговое окно параметров инвертора

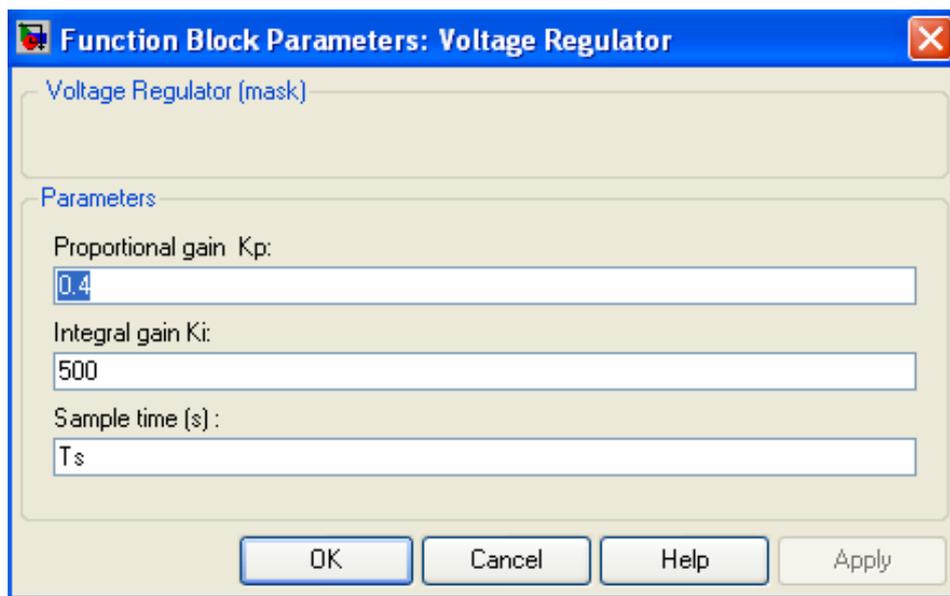


Рис. 35. Диалоговое окно параметров регулятора

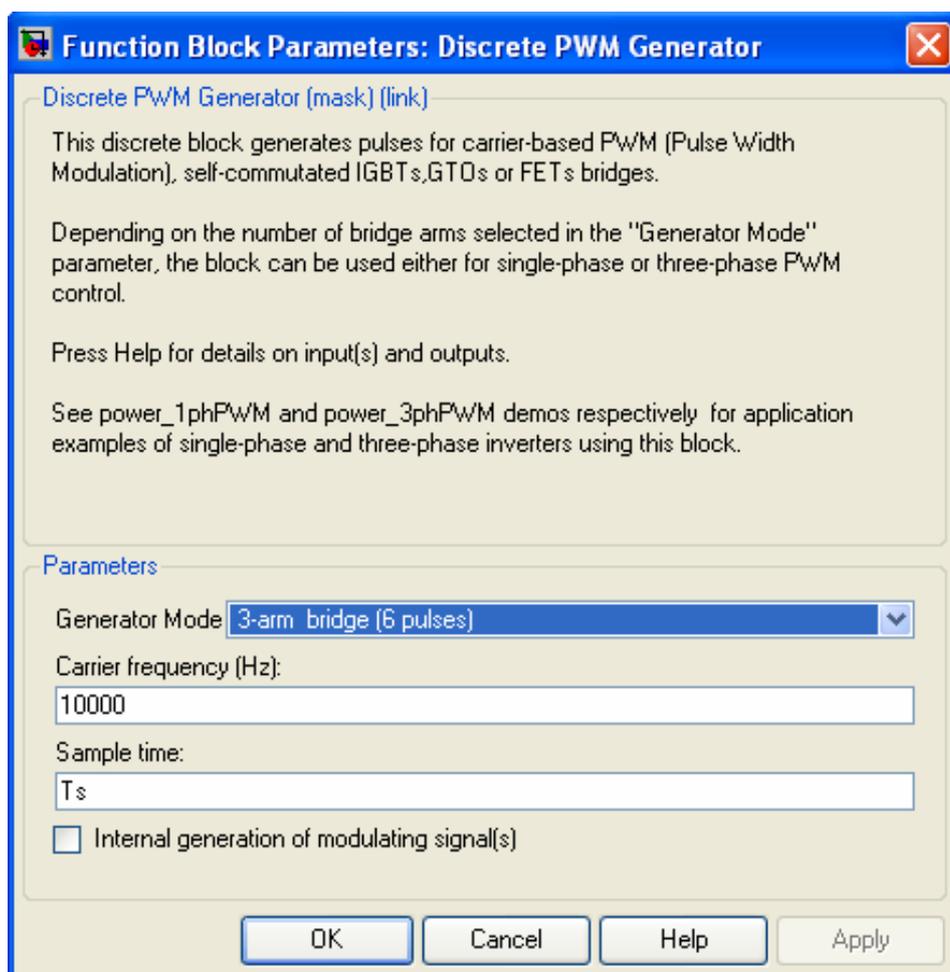


Рис.36. Диалоговое окно параметров ШИМ-генератора

Контрольные вопросы и задания

1. Какие преобразования электрической энергии происходят в преобразователе частоты?
2. Для чего необходимы обратновключенные диоды?
3. Может ли выходное напряжение преобразователя частоты быть равным или больше входного напряжения?
4. Что произойдет с напряжением звена постоянного тока при рекуперативном торможении двигателя?
5. Что такое коэффициент модуляции?
6. Как влияет частота коммутации на ток двигателя?

Приложение 1

Исходные данные машин постоянного тока

Таблица 1. Основные параметры машин постоянного тока

Тип двигателя	Диаметр якоря, мм	Длина якоря, мм	Воздушный зазор, мм	Число пар полюсов	Момент инерции, кг·м ²	Последовательное возбуждение			Параллельное возбуждение		
						Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, мин ⁻¹	Мощность, кВт	Ток, А	Частота вращения, мин ⁻¹
Быстроходное исполнение, 220В											
Д21	167	120	1,25	2	0,12	4,4	26	1340	4,4	24,5	1500
Д22	167	165	1,25	2	0,15	6,5	37	1300	6,5	34	1570
Д31	210	125	1,5	2	0,3	9,5	52,5	1190	9,5	50,5	1420
Д32	210	195	1,5	2	0,42	13,5	72	1100	13	68	1240
Д41	245	190	1,75	2	0,8	18	96	1060	17,5	90,5	1160
Д806	245	275	1,75	2	1,0	23	120	1010	21	110	1060
Д808	280	320	2,0	2	2,0	30	155	850	26	134	825
Тихоходное исполнение, 220В											
Д12	130	150	1,0	2	0,05	2,4	15,0	1150	2,4	14	1230
Д21	167	120	1,25	2	0,12	3,6	22,0	1040	3,6	20,5	1080
Д22	167	165	1,25	2	0,15	4,8	28,0	970	4,8	26	1150
Д31	210	125	1,5	2	0,30	6,8	38,5	900	6,8	37	880
Д32	210	195	1,5	2	0,42	9,5	53,0	760	9,5	51	800
Д41	245	190	1,75	2	0,8	13	71,0	730	13	69,5	720
Д806	245	275	1,75	2	1,00	17	92,0	640	16	84	710
Д808	280	320	2,0	2	2,00	24	125,0	615	22	112	630

Таблица. 2. Обмоточные данные машин постоянного тока

Тип двигателя	Число пазов	Число проводников в пазу	Число параллельных ветвей	Тип обмотки	Число витков параллельно обмотки возбуждения	Сопротивление обмотки якоря при 20 °С	Номинальный магнитный поток на полюс	Число витков на полюс	Сопротивление обмотки возбуждения (последовательная обмотка)	Ток возбуждения	Активное сопротивление параллельной обмотки
	Z	N	a		ω ,	$r_{я20}$	$\Phi_{ня}$, $10^{-2} Вб$			I_B	
Быстроходное исполнение, 220В											
Д21	29	24	2	Волновая	690	0,356	0,657	18,5	0,071	0,8	228
Д22	29	18	2		522	0,202	0,89	18,5	0,066	0,87	206
Д31	31	16	2		492	0,138	1,01	18,5	0,035	1,25	140
Д32	31	12	2		372	0,085	1,64	18,5	0,026	1,35	132
Д41	31	20	2		310	0,047	1,96	9	0,013	1,35	128
Д806	31	16	2		246	0,031	2,72	9	0,010	1,26	138
Д808	35	12	2		210	0,0185	3,96	6	0,006	2,60	67
Тихоходное исполнение, 220В											
Д12	25	40	2	Волновая	990	1,13	0,466	24,5	0,138	0,39	496
Д21	29	32	2		920	0,66	0,62	18,5	0,071	0,80	228
Д22	29	24	2		696	0,370	0,896	18,5	0,066	0,87	206
Д31	31	24	2		738	0,325	0,936	18,5	0,035	1,25	140
Д32	31	18	2		558	0,200	1,45	13,5	0,026	1,35	132
Д41	31	16	2		492	0,11	1,800	12	0,021	1,35	128
Д806	31	12	2		372	0,0675	2,700	12	0,015	1,26	138
Д808	35	16	2		278	0,034	3,960	9	0,011	2,60	67

Исходные данные асинхронных машин

Типоразмер	Номинальная мощность P _н , кВт	Напряжение линейное U _л , В	Частота f _ц , Гц	Активное сопротивление обмотки статора r _с , Ом	Активное сопротивление обмотки статора r _г , Ом	Индуктивность статора L _с , Гн	Индуктивность ротора L _г , Гн	Индуктивность магнит- ной цепи L _м , Гн	Магнитный поток Φ _т , x10 ⁻² , Вб	Момент инерции ротора J _г , кг·м ²
Синхронная частота вращения 3000 мин⁻¹										
112M2	7,5	380	50	0,6176	0,3908	0,0033	0,0051	0,1556	1,408	0,0131
132M2	11	380	50	0,4010	0,2517	0,0023	0,0035	0,1251	1,749	0,024
160S2	15	380	50	0,2579	0,1596	0,0020	0,0030	0,0737	1,926	0,039
160M2	18,5	380	50	0,1979	0,1293	0,0015	0,0025	0,0615	2,254	0,045
180S2	22	380	50	0,1851	0,1330	0,0015	0,0013	0,0558	2,237	0,063
180M2	30	380	50	0,1125	0,0880	0,0010	0,0009	0,0412	3,013	0,076
Синхронная частота вращения 1500 мин⁻¹										
112M4	5,5	380	50	0,9176	0,6604	0,0054	0,0084	0,1557	0,990	0,02
132S4	7,5	380	50	0,6679	0,4357	0,0042	0,0053	0,1179	1,076	0,032
132M4	11	380	50	0,4075	0,2860	0,0028	0,0037	0,0840	1,507	0,045
160S4	15	380	50	0,3037	0,2159	0,0019	0,0029	0,0590	1,565	0,075
160M4	18,5	380	50	0,2318	0,1778	0,0015	0,0024	0,0512	1,868	0,087
180S4	22	380	50	0,2012	0,1103	0,0015	0,0020	0,0430	1,764	0,16
180M4	30	380	50	0,1323	0,0809	0,0011	0,0016	0,0379	2,292	0,20
Синхронная частота вращения 1000 мин⁻¹										
112MA6	3,0	380	50	2,3344	1,5165	0,0071	0,0103	0,1858	0,5789	0,024
112MB6	4,0	380	50	1,6935	1,2146	0,0057	0,0085	0,1576	0,7044	0,029
132S6	5,5	380	50	1,3354	0,6688	0,0051	0,0058	0,1171	0,7610	0,048
132M6	7,5	380	50	0,8493	0,4415	0,0034	0,0040	0,0823	1,0797	0,067
160S6	11	380	50	0,5207	0,2746	0,0028	0,0040	0,0663	1,1644	0,11
160M6	15	380	50	0,3370	0,1927	0,0020	0,0029	0,0524	1,6435	0,15
180M6	18,5	380	50	0,2860	0,1349	0,0016	0,0027	0,0530	1,509	0,27
Синхронная частота вращения 750 мин⁻¹										
112MA8	2,2	380	50	3,3176	2,0546	0,0113	0,0159	0,1654	0,4566	0,024
112MB8	3,0	380	50	2,1598	1,5444	0,0086	0,0121	0,1232	0,5855	0,029
132S8	4,0	380	50	1,5476	0,9927	0,0069	0,0102	0,1028	0,6288	0,053
132M8	5,5	380	50	1,0873	0,7489	0,0053	0,0080	0,0850	0,8369	0,074
160S8	7,5	380	50	0,6950	0,4224	0,0050	0,0069	0,0693	0,8793	0,074
160M8	11	380	50	0,4389	0,3114	0,0037	0,0052	0,0529	1,168	0,15
180M8	15	380	50	0,4298	0,1993	0,0024	0,0043	0,0546	1,162	0,27

Приложение 3

Исходные данные синхронных двигателей с постоянными магнитами

№ п/п	Тип двигателя	Число пар полюсов	Активное сопротивление обмотки статора	Индуктивность статора	Магнитный поток	Напряжение	Частота вращения	Момент инерции
			Ом	мГн	Вб	В	мин ⁻¹	кг·м
1	ДВЛ315	15	0,958	22,2	0,607	189	120	1,6
2	ДВЛ315	15	0,958	22,2	0,607	169	96	1,6
3	ДВЛ225L	12	0,601	10,94	1,596	191	150	1,5
4	ДВЛ225M	12	2,62	40,06	0,925	189	150	0,8
5	ДВЛ200L	12	0,511	7,72	2,238	178	150	0,9
6	ДВЛ200M	12	2,48	32,36	1,265	187	94	0,55
7	ДВЛ180L	12	0,549	6,87	2,742	181	151	0,9
8	ДВЛ180M	12	2,49	27,27	1,503	184	94	0,5

Приложение 4

Исходные данные тихоходных асинхронных двигателей

Типоразмер	Номинальная мощность	Напряжение линейное	Частота	Активное сопротивление обмотки статора	Активное сопротивление обмотки ротора	Индуктивность статора	Индуктивность ротора	Индуктивность магнитной цепи	Магнитный поток	Момент инерции ротора
	кВт	В	Гц	Ом	Ом	мГн	мГн	мГн	Вб	Кг·м
АН225S12	3,0	173	12	0,6122	1,1607	6,0	11,1	69,0	2,66	1,19
Габарит 280 мм ($D_a = 490$ мм)										
АН280S10	3,14	164	10	0,6802	0,2434	10,3	9,9	117,3	2,42	1,88
АН280S10	6,28	173	10	0,3720	0,1588	6,8	6,2	52,3	3,19	2,26
АН280S12	3,14	138	8	0,5089	0,2918	7,6	11,1	64,3	2,46	1,88
АН280S12	3,14	156	10	0,5089	0,2918	7,6	11,4	80,6	2,32	1,88
АН280S12	3,14	173	12	0,5089	0,2918	7,6	11,5	87,9	2,20	1,88
АН280M12	6,28	135	8	0,2393	0,1753	4,6	6,7	35,2	3,36	2,64
АН280M12	6,28	159	10	0,2393	0,1753	4,6	6,9	41,6	3,53	2,64
АН280M12	6,28	173	12	0,2393	0,1753	4,6	7,0	50,8	3,29	2,64
Габарит 315 мм ($D_a = 530$ мм)										
АН315M12	6,28	121	12	0,1535	0,0765	2,1	3,0	37,1	3,08	4,59

Библиографический список

1. Петров, Л. П. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением / Л.П. Петров [и др.] – М.: Энергия, 1977. – 200 с.
2. Шенфельд, Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шенфельд, Э. Хабигер; пер. с нем. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.
3. Москаленко, В. В. Электрический привод: учебник для электротехн. спец. техникумов / В.В. Москаленко. – М.: Высш.шк., 1991. – 430 с. – ISBN 5-06-001776-1.
4. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.Н. Осипов. – М.: АСАДЕМА, 2005. – 304 с. – ISBN 5-7695-2911-3.
5. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с. – ISBN 5-7695-2306-9.
6. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2005. – 576 с. – ISBN 5-7695-1314-4.
7. Браславский, И. Я. Энергосберегающий электропривод: учеб. пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2005. – 256 с. – ISBN 5-7695-1704-2.
8. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода: учеб. пособие / Н.Ф. Ильинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с. – ISBN 5-7046-0874-4.

Оглавление

Организация и порядок выполнения расчетно-лабораторных работ.....	3
Расчетно-лабораторная работа № 1. Исследование двигателя постоянного тока с последовательным и параллельным возбуждением.....	3
Расчетно-лабораторная работа № 2. Исследование электропривода с асинхронным двигателем при векторном управлении.....	9
Расчетно-лабораторная работа № 3. Исследование электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами.....	16
Расчетно-лабораторная работа № 4. Исследование работы преобразователя частоты с асинхронным двигателем.....	24
Приложение 1. Исходные данные машин постоянного тока.....	32
Приложение 2. Исходные данные асинхронных машин.....	34
Приложение 3. Исходные данные синхронных двигателей с постоянными магнитами.....	35
Приложение 4. Исходные данные тихоходных асинхронных двигателей.....	35
Библиографический список.....	36