

К особым режимам работы можно отнести работу системы при значениях частоты вращения 20% и 80% от номинального значения. В каждом из режимов оцениваем реакцию системы на 50% и 100% изменение момента отдельно в сторону увеличения и уменьшения. Аналогично анализируем реакцию системы на ступенчатое изменение задающего воздействия.

Таким образом, в результате проведенных исследований и выполненной работы были сделаны выводы о недопустимости применения линейной модели 4-

квадрантного привода постоянного тока для синтеза системы управления в связи со значительным расхождением заданных динамических параметров и полученных в процессе моделирования. Также был предложен структура нечеткой системы управления, методы построения базы логических правил нечеткого регулятора и разработаны рекомендации оценки работоспособности систем управления с регуляторами данного типа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2005. 200 с.
2. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб: БХВ Петербург, 2005. 736 с.: ил.
3. Круглов В.В., Дли М.И. Компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. М.: Физматлит, 2002.
4. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоаматор, 2008. 972 с.

УДК 621.34:303.094.7

КАВЕРИН В.В.,  
ЭМ Г.А.

## Имитационное моделирование полупроводникового электропривода постоянного тока

В настоящее время в различных отраслях промышленности широкое распространение получил полупроводниковый электропривод постоянного тока (ППЭП ПТ) с двигателями средней мощности. Технологические особенности, а также нормативы безопасности, ГОСТы и др. документы для ряда машин и механизмов, оснащенных ППЭП ПТ, требуют реализации управляемых генераторных режимов работы привода. В этих условиях проектирование и надежная эксплуатация электропривода без знания его статических и динамических свойств невозможна.

Использование аналитических методов исследования характеристик ППЭП ПТ требует достаточно больших затрат времени. Современные средства имитационного моделирования, такие как пакеты прикладных программ (ППП) *MatLab-Simulink*, *Multisim*, *ANSYS*, позволяют решать задачи подобного класса значительно быстрее.

В настоящей работе рассматривается порядок проведения имитационных экспериментов в ППП *MatLab 7.01 – Simulink 6.1* генераторных режимов работы электроприводов постоянного тока на примере двигателей независимого возбуждения серии 4ПФ в диапазоне мощности от 5,5 до 68 кВт. В качестве силового преобразователя используется в первом случае трехфазный полностью управляемый тиристорный преобразователь, а во втором случае – импульсный преобразователь повышенной частоты на силовых

гибридных транзисторах (*IGBT*).

На рисунке 1,а представлена обобщенная структурная схема ППЭП ПТ с тиристорным преобразователем ТП, позволяющим обеспечивать работу привода как в двигательном, так и в генераторных режимах.

Здесь особенностью источника соизмеримой мощности (ИСМ) является наличие внутреннего сопротивления, величина которого соизмерима с эквивалентным сопротивлением нагрузки.

На рисунке 1,б изображена структурная схема ППЭП ПТ с широтно-импульсным преобразователем ШИП в режиме динамического торможения, которая характеризуется наличием блока ограничения напряжения БОН [1].

Каждая из представленных схем как объектов исследования представляет собой совокупность преобразователя, характеризующегося дискретностью действия, и электромеханической системы, процессы в которой носят непрерывный характер [2].

Задача исследования статических характеристик ППЭП ПТ – механических, электромеханических, регулировочных, а также динамических – переходной характеристики и логарифмических (ЛАЧХ и ЛФЧХ) для схем, изображенных на рисунках 1,а и 1,б, обусловлена как необходимостью синтеза систем автоматического регулирования, так и проектирования устройств защиты и ограничения предельных параметров электропривода.

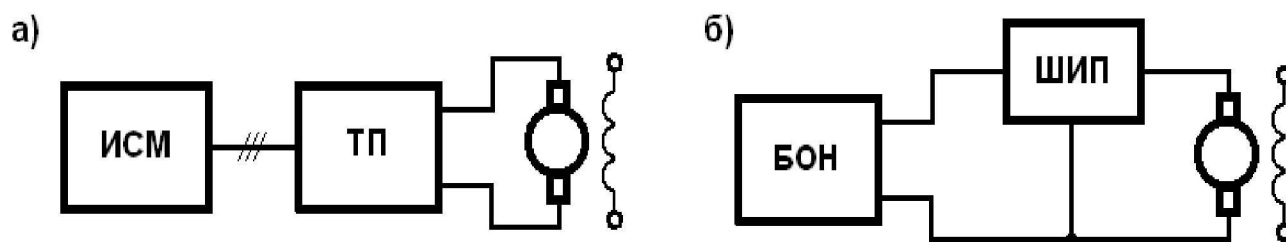


Рисунок 1 – Структурные схемы ППЭП ПТ

Одной из особенностей статических характеристик электропривода постоянного тока, работающего совместно с ТП и ШИП, является необходимость учета влияния индуктивных компонентов цепи якоря на их характер. Средства ППП *MatLab-Simulink* позволяют автоматизировать исследование статических и динамических характеристик объекта путем формирования специальных входных воздействий с одновременной табличной регистрацией анализируемых параметров и графическим представлением результатов моделирования.

Использование ЛАЧХ и ЛФЧХ при исследовании электропривода позволяет линеаризовать компоненту его неизменной части «канал управления – электромагнитный момент, скорость (ток якоря)». Однако возможности набора инструментов ППП *MatLab-Simulink* ограничены при работе с дискретными моделями [3]. В связи с этим получение ЛАЧХ и ЛФЧХ моделей электропривода, содержащих ТП и ШИП, по каналу управления представляет достаточно большую сложность.

Важнейшим этапом в подготовке имитационного эксперимента является выбор численного метода решения и его оптимальных параметров, а также установка начальных условий в соответствии с поставленной задачей.

Исследование статических характеристик реализуется путем регистрации выходного параметра в функции аргумента, линейно изменяемого от 0 до максимального значения на протяжении установленного времени моделирования с последующим анализом полученных результатов.

В этих условиях предлагается следующая методика проведения имитационного эксперимента с автоматизированным определением статических характеристик электропривода в ППП *MatLab-Simulink*.

1. Выбор метода интегрирования. Для нелинейных динамических звеньев типа «силовой полупроводниковый преобразователь» рекомендуется использование метода *ode23tb* – одношаговый явный метод Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка [4].

2. Выбор шага интегрирования. С целью минимизации времени проведения эксперимента целесообразно применение метода интегрирования с переменным шагом. Опыт проведения имитационных экспериментов с силовыми полупроводниковыми элементами позволяет рекомендовать ограничение только максимального значения шага интегрирования, в этом случае минимальный шаг интегрирования задается автоматическим.

Значение максимального шага интегрирования выбирается из следующих условий:

- шаг не должен превышать 0,1 минимальной постоянной времени исследуемой системы;

- для случая с ТП величина шага не должна превышать некоторого значения, определяемого из соотношений диапазона регулирования, частоты промышленной сети напряжения, режима работы и схемы силовой части электропривода;

- для случая с ШИП величина шага не должна превышать значения, определяемого из соотношений диапазона регулирования и частоты коммутации импульсного преобразователя.

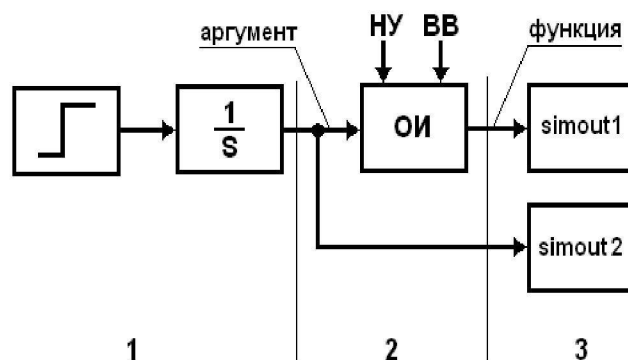
В таблице приведены рекомендуемые значения максимального шага интегрирования для имитационного моделирования ППЭП ПТ машин и механизмов, рассмотренных в [5].

3. Обоснование допустимой погрешности измерения. Выбор абсолютной погрешности зависит от ожидаемых максимальных значений сигналов. Рекомендуемое соотношение составляет 0,01-0,001 максимального значения сигнала тока и напряжения в схеме [3].

4. Задание периода моделирования. Период моделирования задается начальным и конечным значениями времени протекания исследуемого процесса.

При снятии статических характеристик моделей, содержащих, в том числе типовые динамические звенья, интенсивность изменения задающего линейно изменяемого воздействия определяется необходимостью минимизировать влияние динамических процессов, протекающих в электромеханической части двигателя, на статические характеристики ППЭП ПТ.

На рисунке 2 представлена обобщенная функциональная схема имитационной модели ППЭП ПТ, предназначенная для исследования статических характеристик.



1 – формирователь задающего линейно изменяемого управляющего воздействия;

2 – ОИ – объект исследования, НУ – начальные условия, ВВ – возмущающее воздействие;

3 – регистрирующий измерительный комплекс

Рисунок 2 – Обобщенная функциональная схема имитационной модели ППЭП ПТ для исследования статических характеристик

Рекомендуемые значения максимального шага интегрирования

Тип преобразователя	Схема силовой части	Режим работы привода	Диапазон регулирования	Частота коммутации преобразователя	Рекомендуемый максимальный шаг интегрирования
ТП	Трёхфазный полностью управляемый	двигательный	1:100	300 Гц	10 мкс
		генераторный			
ШИП	Импульсный преобразователь повышенной частоты	генераторный		1 кГц	0,1 мкс

Здесь величина постоянной составляющей на входе интегратора формирователя задающего линейно изменяемого воздействия выбирается из условия достижения аргументом номинального значения в конце периода моделирования.

Рекомендуемые при этом значения периода моделирования для ППЭП ПТ средней мощности могут быть получены из соотношения:

$$T_M = 100 \cdot T_{\max\text{ОИ}}, \quad (1)$$

где  $T_M$  – постоянная времени формирователя задающего линейно изменяемого воздействия;

$T_{\max\text{ОИ}}$  – максимальная постоянная времени объекта исследования.

Совокупность входных и выходных координат объекта исследования, их начальные условия и диапазоны изменения, величины управляющих и возмущающих воздействий определяются в каждом конкретном случае характером задач, решаемых в ходе имитационного моделирования.

Определение динамических свойств ППЭП ПТ возможно, в том числе, посредством оценки реакции объекта на единичное ступенчатое воздействие. При этом последовательность действий при выборе основных параметров моделирования рекомендуется осуществлять по приведенной ранее методике для снятия статических характеристик.

Как отмечено выше, получение ЛАЧХ и ЛФЧХ моделей электропривода, содержащих силовые полупроводниковые преобразователи, по каналу управления осложнено дискретностью характеристик элементов объекта. В данной работе предлагается методика снятия ЛАЧХ и ЛФЧХ в ППП *MatLab* посредством использования управляющего сигнала силового преобразователя (содержащего как постоянную составляющую, так и сигнал синусоидальной формы), с последующей селекцией гармонической составляющей выходного сигнала с помощью избирательного фильтра. Следует отметить, что предлагаемая методика реализуема только для режима непрерывного тока в силовой цепи ППЭП ПТ.

Обобщенная функциональная схема имитационной модели ППЭП ПТ для снятия логарифмических характеристик представлена на рисунке 3.

При построении динамических моделей рассматриваемых типов электропривода с целью минимизации ошибки, обусловленной работой силового полупроводникового преобразователя, рекомендуется использовать избирательный фильтр 4-го порядка. Для уменьшения искажений, вносимых избирательным фильтром, его показатель колебательности следует принять равным 1. Коэффициент передачи всего избирательного фильтра на частоте резонанса также должен быть равен 1. Фильтр, выполненный по такой схеме, не имеет фазового запаздывания на резонансной частоте [6].

С учетом рассмотренных положений получение ЛАЧХ и ЛФЧХ рекомендуется выполнять по следующей методике.

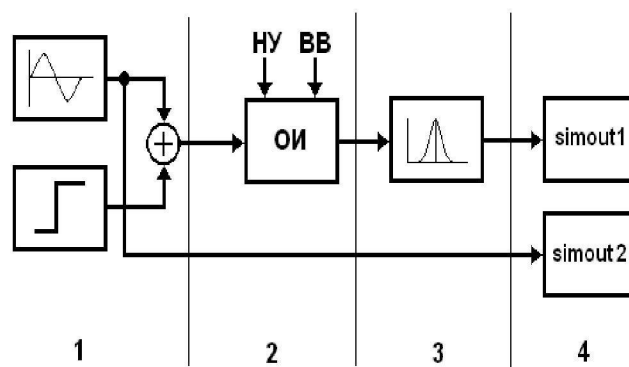
1. Выбор метода и шага интегрирования, а также погрешности измерения осуществляется по методике,

аналогичной описанной выше применительно к определению статических характеристик электропривода, включая рекомендуемые значения из таблицы.

2. Диапазон изменения частоты гармонического задающего сигнала определяется условием:

$$\frac{1}{2\pi \cdot 10T_{\max}} \leq f \leq \frac{10}{2\pi \cdot T_{\min}}, \quad (2)$$

где  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  – соответственно, минимальная и максимальная величины постоянной времени линейной части имитационной модели.



1 – формирователь задающего управляющего воздействия; 2 – ОИ – объект исследования, НУ – начальные условия, ВВ – возмущающее воздействие; 3 – избирательный фильтр; 4 – регистрирующий измерительный комплекс

Рисунок 3 – Обобщенная функциональная схема имитационной модели ППЭП ПТ для снятия логарифмических характеристик

Дополнительным ограничением максимальной величины частоты гармонического задающего сигнала является частота основной гармоники пульсаций тока в силовой части управляемого преобразователя.

3. Значения частот задающего гармонического сигнала следует выбирать с учетом нелинейности логарифмической шкалы из условия равенства линейных интервалов в пределах одной декады. При этом длина интервалов должна определяться целым числом, величина которого зависит от необходимой точности построения ЛАЧХ и ЛФЧХ.

4. Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ рекомендуется осуществлять с использованием традиционных методов на основе зависимостей амплитудных значений и фазового сдвига, соответственно, между выходным и входным гармоническими регистрируемыми сигналами [2].

Таким образом, в работе предложены методики проведения имитационных экспериментов по определению статических и динамических свойств полупроводникового электропривода постоянного тока с двигателями средней мощности и построения ЛАЧХ и ЛФЧХ, которые могут быть использованы для исследования регулируемого электропривода как в двигательном, так и в генераторных режимах работы, а также при синтезе систем автоматического регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каверин В.В. Регулировочные характеристики электропривода постоянного тока в режиме динамического торможения // Тр. ун-та; КарГТУ. Караганда, 2009. № 3. С.77-79.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.
3. Компьютерное моделирование и идентификация электротехнических комплексов: учеб. пособие. В 3-х ч. Часть 3 / Б.Н. Фешин, Ю.Ф. Булатбаева, Г.С. Нурмаганбетова, Г.И. Паршина, Ш.З. Телбаева; Карагандинский гос. техн. ун-т. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2010. 63 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб: КОРОНАпринт, 2007. 256 с.
5. Каверин В.В., Эм Г.А. Генераторные режимы регулируемого электропривода горных машин // Труды XII Международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030» (23-24 июня 2009 г.). Выпуск 2 / Министерство образования и науки РК, Карагандинский государственный технический университет. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2009. С.225-227.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Т.1. / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 598 с.

УДК 621.313.2:621.314.58

ЭМ Г.А.

Генераторные режимы четырехквadrантного тиристорного электропривода постоянного тока

Замечательные регулировочные свойства, жесткость механических характеристик, высокая плотность энергии и экономичность машин постоянного тока с независимым возбуждением обусловили их распространение в различных отраслях промышленности. В частности, тиристорный электропривод постоянного тока (ТЭП ПТ) используется в шахтных подъемных установках, экскаваторах, крановых механизмах, угледобывающих комбайнах, буровых установках и др. В процессе эксплуатации указанных классов горных машин и механизмов востребованы как двигательный, так и генераторные режимы работы. Причем управляемые генераторные режимы технологического торможения для большинства рассматриваемых машин носят продолжительный характер.

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика ТЭП ПТ независимого возбуждения рассматриваемых классов горных машин и механизмов, в которой отражены, в том числе, диапазоны скорости, используемые генераторные режимы и их продолжительность, определяемые технологическими требованиями и нормативами безопасной эксплуатации [1].

Функциональная схема ТЭП ПТ с реверсом по цепи якоря приведена на рисунке 1.

Двухкомплeктный (реверсивный) тиристорный преобразователь ТП, обеспечивает работу ТЭП ПТ во всех четырех квадрантах механической характеристики как в двигательном, так и в генераторных режимах. Система автоматического регулирования САР в соот-

ветствии с заданием  $U_3$  и сигналами датчиков тока  $BA$  и скорости  $BR$  вырабатывает сигнал управления  $U_y$ , подаваемый на управляющие электроды тиристоров.

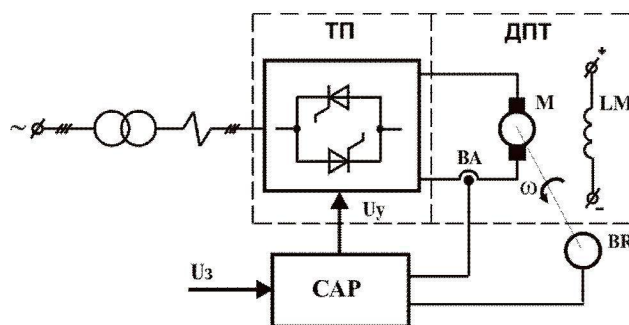


Рисунок 1 – Функциональная схема ТЭП ПТ с реверсом по цепи якоря

Двигательный режим ТЭП ПТ изучен достаточно полно. В отличие от него управляемые генераторные режимы, а также динамические свойства четырехквadrантного ТЭП ПТ при переходе из двигательного режима в генераторный и обратно в составе регулируемого четырехквadrантного электропривода исследованы в недостаточной степени [1, 2].

Как известно, в электроприводе с двигателем постоянного тока независимого возбуждения могут быть использованы три возможных генераторных режима: динамическое торможение, противovключение и ре-

Таблица 1 – Сравнительная характеристика ТЭП ПТ горных машин и механизмов

Область применения	Диапазон скорости	Мощность привода, кВт	Используемые генераторные режимы	Продолжительность генераторных режимов
Шахтные подъемные машины	1:100	70 – 220	противovключение, динамическое торможение	продолжительный
Буровые станки	1:10 – 1:200	10 – 100	динамическое и рекуперативное торможение	продолжительный, повторно-кратковременный
Экскаваторы	1:10	10 – 200	динамическое и рекуперативное торможение	повторно-кратковременный
Механизмы подачи очистных комбайнов	1:25	10 – 60	противovключение, динамическое и рекуперативное торможение	продолжительный, кратковременный
Крановые механизмы	1:15 – 1:30	10 – 200	противovключение, динамическое торможение	повторно-кратковременный