

3. Фешин Б. Н., Брейдо И.В., Крицкий А.Б. Сетевые виртуально-аппаратные лабораторные комплексы систем управления и контроля как средства интеграции науки, образования и производства // Региональная научно-практическая конференция «Инновационная роль науки в подготовке современных инженерных кадров» (7-8 декабря, 2006. Караганда.)
4. Jürgen Helmich, Manual PCS Compact Workstation. Esslingen, Germany: Festo Didactic GmbH & Co, 2004. 49 с.
5. www.festo.com
6. Jürgen Helmich, Process Control System – Collection of data sheets. - Esslingen, Germany: Festo Didactic GmbH & Co, 2004. 94 с.

УДК 621.313.2:621.314.58

Анализ существующих методов теоретического исследования тиристорного электропривода постоянного тока

*Г.А. ЭМ, ст. преподаватель кафедры АПП,
Карагандинский государственный технический университет*

Ключевые слова: теория вентильного электропривода, тиристорный электропривод постоянного тока, методы анализа работы, расчет параметров, имитационное моделирование.

При всеобщем увлечении частотно-регулируемым асинхронным электроприводом в последние годы неоправданно ослаб интерес к машинам постоянного тока. Между тем двигатели постоянного тока различных серий и модификаций продолжают выпускать, совершенствовать и широко использовать на практике. При этом замечательные регулировочные характеристики, жесткость механических характеристик, высокая плотность энергии и экономичность машин постоянного тока обеспечили их распространение, в том числе и в горной промышленности.

К неоспоримым преимуществам регулируемого электропривода с двигателями постоянного тока также следует отнести:

- возможность работы «на упор» продолжительное время при номинальном значении тока, что практически невозможно реализовать в приводе переменного тока;

- отсутствие при малых значениях угловой скорости пульсаций электромагнитного момента, характерных для частотно-регулируемого асинхронного электропривода и др.

Основные направления исследований в области тиристорного электропривода постоянного тока.

Анализ и синтез систем тиристорного электропривода постоянного тока (ТЭП ПТ) базируется на теории электромагнитных процессов в вентильных преобразователях. Среди многочисленных трудов, посвященных исследованию и разработке методов расчета переходных и установившихся процессов в цепях с силовыми вентильными преобразователями, выделяется фундаментальная работа Л.Р. Неймана [1], в которой представлена универсальная математическая модель вентильного преобразователя с учетом основных факторов, влияющих на характер переходных процессов. В этой работе были получены разностные уравнения для выпрямленного тока, характеризующие тиристорный преобразователь как импульсную систему.

Методы анализа динамики электромагнитных

процессов в вентильных преобразователях детально рассмотрены и систематизированы в [2]. В этой работе описаны следующие основные аналитические методы расчета и исследования статических и динамических режимов силовых схем вентильных преобразователей: припасовывания (кусочно-припасовочный), разностных уравнений, спектрально-операторный, гармонических составляющих (гармонического анализа), сопряженных комплексных амплитуд, Φ -функций (метод Т. Такеути), гармонического синтеза, непрерывной аппроксимации, огибающей (с использованием интеграла Дюамеля), переключающих и разрывных функций и др.

Кроме того, в [2] рассмотрен и теоретически обоснован модифицированный метод отдельных составляющих, а также метод расчета основных интегральных характеристик токов и напряжений, коэффициентов ряда Фурье, коэффициента гармоник непосредственно по операторному изображению исследуемого процесса.

Дальнейшим исследованиям, методам расчета и анализа работы различных схем силового вентильного преобразователя посвящены работы [3-6].

Необходимость учета дискретных свойств вентильного преобразователя на его работу была отмечена А.А. Булгаковым в [3]. Свойства вентильного полупроводникового преобразователя как элемента управляемой системы выявляются более полно при комплексном исследовании системы, состоящей из трех взаимосвязанных составляющих: силовой части (тиристорного преобразователя и двигателя), системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и системы автоматического регулирования (САР) координатами электропривода.

Исследования, проведенные с этих позиций В.П. Шипило [4], позволили выявить автоколебательные режимы, вызываемые спецификой свойств тиристорного преобразователя – дискретностью управляющего сигнала и тем, что запирающие моменты происходит в моменты уменьшения тока до нулевого значения и не

может быть осуществлено в этот период с помощью сигнала управления.

В дальнейшем на основе этих представлений с использованием методов теории дискретных систем В.П. Шипило разработал способ исследования переходных процессов в вентильном приводе и выявил возможности систем с переходными процессами конечной длительности, осуществимыми только в дискретных системах.

Методы исследования и вопросы теории вентильного электропривода дальнейшее развитие получили в [5-10].

В [5] предложены методы анализа и синтеза вентильного электропривода с учетом дискретности и неполной управляемости однооперационных силовых тиристоров.

В систематизированном виде вопросы динамики замкнутых систем при малых и больших возмущениях (математическое обоснование импульсных динамических моделей различных типов управляемых выпрямителей) изложены в [6], там же выполнен анализ и синтез структур регулируемого и следящего вентильных электроприводов с учетом ограничений на динамику, накладываемых нелинейным характером работы тиристорных выпрямителей.

Частотные методы исследования динамических свойств электропривода постоянного тока с независимым возбуждением и математические модели электромеханической системы ТП-Д изложены в [7].

Однако в рассмотренных работах практически не затронуты такие важнейшие современные методы теоретического исследования, как методы имитационного моделирования.

В [10] исследованы характеристики ТЭП ПТ подъемных установок с учетом области прерывистых токов для электропривода с реверсом возбуждения, сформулированы требования к электроприводу системы ТП-Д и приведены его математическое описание и синтез САР.

Вопросам математического описания режимов работы машины постоянного тока уделена значительная часть трудов Н.В. Донского, А.Д. Поздеева, А.И. Вольдека, И.П. Копылова, В.А. Бесекерского и др.

Особенностям управления ТЭП ПТ горных машин, работающих в условиях маломощных сетей (при электроснабжении от источника энергии соизмеримой мощности), а также влиянию реальных условий эксплуатации на структуру и параметры тиристорного электропривода посвящены работы А.А. Барьюдина, В.Ф. Бырьки, И.В. Брейдо, И.В. Петерса, Н.В. Макаренко и др.

Однако в указанных работах не разработаны эффективные технические решения, позволяющие реализовать алгоритмы оптимального управления тиристорным электроприводом в условиях «мягкой» сети; не определены рабочие области генераторных режимов рекуперации и противовключения, границы оптимального перехода из одного режима в другой и средства реализации совместного использования указанных режимов в тиристорном электроприводе.

Методы и средства выполнения микропроцессорных систем управления ТЭП ПТ, а также элементы

теории расчета, алгоритмы управления и способы их реализации рассмотрены в [11, 12].

В [12] изложены основные принципы и методы построения информационно-логических датчиков, исполнительных средств СИФУ и наладочных устройств, приведены методы расчета настроечных параметров, описаны методы экспериментальных исследований и наладки ТЭП ПТ с микропроцессорным управлением. При выборе интервала повторения вычислений и регулируемого параметра токового контура для цифрового управления авторы обосновали преимущества синхронного принципа управления с интервалом повторения вычислений, равным естественному интервалу дискретности – интервалу преобразования вентильного преобразователя. При этом расчет переходных процессов в импульсной модели выполняется посредством дискретного преобразования Лапласа (D -преобразования). Следует отметить, что более удобным для практического применения является другое, получившее известность представление решетчатой функции – Z -преобразование [6].

Однако предложенные в [12] алгоритмы управления контуром тока, характеризующиеся средними значениями тока и составленные из предположения, что электрическая сеть, питающая преобразователь, симметрична, а вентили являются идеальными коммутаторами, не позволяют учесть в полном объеме импульсный характер работы тиристорного преобразователя, поскольку описывают только непрерывный режим выпрямления тока.

Отметим, что в последние годы в связи с появлением современных компьютерных технологий большое внимание уделяется исследованию ТЭП ПТ методами имитационного моделирования.

Анализ методов имитационного моделирования для исследования статических и динамических свойств ТЭП ПТ.

Использование исключительно аналитических методов для исследования статических и динамических свойств тиристорного электропривода с учетом импульсной формы напряжения и односторонней проводимости силовых полупроводниковых элементов, используемых в нем, связано с большим объемом вычислений и требует значительных затрат времени. В последние годы с возникновением компьютерных технологий, опирающихся на мощные прикладные пакеты программ (ППП), появилась возможность ко многим вопросам исследования подойти на совершенно новой основе.

Современные средства имитационного моделирования, такие как ППП *MatLab-Simulink*, *Multisim*, *ANSYS* и др., позволяют решать задачи подобного класса значительно быстрее. Кроме того, средства ППП обеспечивают автоматизацию процессов исследования. В частности, ППП *MatLab-Simulink* совмещает снятие статических и динамических характеристик объекта с одновременной табличной регистрацией анализируемых параметров и графическим представлением результатов моделирования.

Автоматическое снятие статических (механических, регулировочных, электромеханических) характеристик может быть реализовано в ППП *MatLab-*

Simulink путем регистрации выходного параметра в функции аргумента, линейно изменяемого от начального до максимального значения на всем протяжении установленного времени моделирования, с последующим анализом полученных результатов. Такая форма задания линейно изменяемого входного воздействия позволяет обеспечить неизменную величину погрешности моделирования [13].

Следует отметить, что рассматриваемый ТЭП ПТ как объект моделирования представляет собой совокупность силового полупроводникового преобразователя, характеризующегося дискретностью действия, и электромеханической системы, процессы в которой носят непрерывный характер.

В [2] определены основные этапы расчетов, под-вергаемых автоматизации при исследовании и анализе вентильных преобразователей с использованием ЭВМ. При этом подход к их выполнению определяется видом используемых моделей вентиля, представляемых в виде пассивного двухполюсника, параметры которого скачком изменяются в момент коммутации (*R*-модель), либо в виде идеального ключа.

При использовании *R*-модели топологическая структура схемы силового преобразователя неизменна и описывается одной и той же системой дифференциальных уравнений, коэффициенты которой изменяются скачком в момент коммутации. При использовании модели идеального ключа в моменты коммутации происходит изменение топологической структуры схемы, что требует переформирования системы дифференциальных уравнений.

В первом случае основные вычислительные затраты приходятся на формирование и решение системы дифференциальных уравнений высокого порядка с переменными коэффициентами, а во втором случае – на переформирование системы дифференциальных уравнений, имеющей минимально возможный порядок.

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.

Для анализа преобразовательных устройств получили распространение как явные, так и неявные методы численного интегрирования.

Явные методы численного интегрирования предназначены для решения систем дифференциальных уравнений первого порядка, приведенных к нормальной форме, и наиболее часто используются при анализе преобразовательных устройств методом переменных состояния. Основным недостатком этих методов является ограничение на величину шага интегрирования, который для сохранения устойчивости процесса вычисления в общем случае не может превышать минимальной постоянной времени исследуемой схемы.

В неявных методах численного интегрирования величина шага устанавливается не из условия устойчивости вычислительного процесса, а из условий точности решения и намного превышает шаг, максимально достижимый в явных методах. Однако при исполь-

зовании неявных методов на каждом шаге интегрирования необходимо решать систему алгебраических уравнений.

Оба метода применяются достаточно широко для анализа работы различных объектов и систем, в том числе электротехнического и электромеханического направления. Так, для исследования электромагнитных процессов в двухмостовом компенсированном преобразователе используют неявный метод Гира-Нордсика; при анализе преобразователей методом переменных состояния – метод, основанный на разложении в ряд Уолша; для исследования процессов в автономных инверторах и управляемых выпрямителях – явный метод Рунге-Кутты 2-го, 3-го и 4-го порядка. Перспективным считается метод точечных преобразований, описанный в [2].

В [14] отмечается целесообразность применения метода интегрирования с переменным шагом с целью минимизации времени проведения эксперимента, реализованное в ППП *MatLab-Simulink*. При проведении имитационных экспериментов с силовыми полупроводниковыми элементами рекомендуется ограничивать только максимальное значение шага интегрирования, в этом случае минимальный шаг интегрирования задается автоматически.

В этом случае значение максимального шага интегрирования выбирается из следующих условий:

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

- для случая с тиристорным преобразователем величина шага не должна превышать некоторого значения, определяемого из соотношений диапазона регулирования, частоты напряжения промышленной сети, режима работы и схемы силового преобразователя, входящего в состав электропривода.

Рекомендуемое значение максимального шага интегрирования в случае с трехфазным полностью управляемым тиристорным преобразователем для ТЭП ПТ составляет 10 мкс [14].

Одним из важнейших вопросов при подготовке имитационного эксперимента является обоснование допустимой погрешности измерений. Выбор абсолютной погрешности в первую очередь зависит от ожидаемых максимальных значений сигналов. Рекомендуемое соотношение составляет 0,01...0,001 от максимального значения сигнала тока и напряжения в электрической схеме [13].

Период моделирования задается начальным и конечными 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 ТЭП ПТ.

Кроме того, одной из особенностей имитационного моделирования электропривода постоянного тока, работающего совместно с тиристорным преобразователем, является необходимость учета влияния индуктивных компонентов цепи якоря двигателя на

статические и динамические свойства силового управляемого преобразователя, входящего в состав электропривода.

Указанные особенности подробно изложены в [14] при описании методики проведения имитационных экспериментов в ППП *MatLab–Simulink* с автоматизированным определением статических и динамических характеристик тиристорного электропривода постоянного тока на примере двигателей независимо возбуждения средней мощности.

Выводы

Таким образом, на протяжении всего развития автоматизированного электропривода ведутся интенсивные поиски эффективных методов теоретического исследования статических и динамических свойств

полупроводникового (тиристорного) электропривода постоянного тока. Теория переходных процессов и динамики управляемых вентильных систем до сих пор является наименее исследованной областью автоматизированного электропривода. Причем многообразие систем регулируемого электропривода порождает многообразие методов их расчета и проектирования, существенная часть которых в значительной степени между собой взаимосвязана. В последние годы с возникновением компьютерных технологий, опирающихся на мощные прикладные пакеты программ, основное внимание исследователей уделяется методам имитационного моделирования, позволяющим решать указанные задачи с высоким быстродействием и автоматизацией процессов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л.Р. Обобщенный метод анализа переходных и установившихся процессов в цепях с преобразователями с учетом активных сопротивлений // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1972. № 2. С. 3-15.
2. Руденко В.С., Жуйков В.Я., Коротеев И.Е. Расчет устройств преобразовательной техники. Киев: Техніка, 1980. 135 с.
3. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970. 320 с.
4. Шипилов В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. М.: Энергия, 1969. 400 с.
5. Динамика вентильного электропривода постоянного тока / Н.В. Донской, А.Г. Иванов, В.М. Никитин и др.; Под ред. А.Д. Поздеева. М.: Энергия, 1975. 224 с.
6. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления / Н.В. Донской, А.Г. Иванов, В.М. Никитин, А.Д. Поздеев; Под ред. А.Д. Поздеева. М.: Энергоатомиздат, 1984. 352 с.
7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1979. 616 с.
8. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
9. W. Shepherd, L.N. Huley. Power Electronics and Motor Control, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
10. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М. Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема. М.: Недра, 1990. 382 с.
11. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
12. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / Под ред. О.В. Слежановского. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240 с.
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystes и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
14. Каверин В.В., Эм Г.А. Имитационное моделирование полупроводникового электропривода постоянного тока // Тр. унта / КарГТУ. 2010. № 3. С. 96-99.

УДК 622.0025:621.314.632

Оптимизация выбора оборудования АСУ ТП по комплексу технико-экономических критериев (часть I)

Б.Н. ФЕШИН, д.т.н., профессор кафедры АПП,
К.М. СУЛЕЙМЕНОВ, магистрант кафедры АПП,
Н.С. СУЛЕЙМЕНОВ, магистрант кафедры АПП,
Карагандинский государственный технический университет

Ключевые слова: автоматизация, система, управление, технология, процессы, контроль, регулирование, управление, оборудование, выбор, критерии, ограничения, алгоритмы, оптимальные, параметры, динамика.

На рынке технических средств и систем автоматизации нет ограничений на выбор оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Проблема заключается в обосновании приоритетов многокритериальной оптимизации и выполнении ограничений на отдельные

устройства и систему в целом. Определим область анализа для функциональной схемы АСУ ТП, изображенной на рисунке, системами автоматического контроля, регулирования и управления.

АСУ содержит две подсистемы АСУ₁ и АСУ₂ с локальными САУ₁ и САУ₂ (ЛСАУ₁ и ЛСАУ₂) и верх-