

УДК 62-83:52

М. П. Гаврилов

## МЕТОД АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭКСКАВАТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СИСТЕМЕ «НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ - АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Применение в главных механизмах экскаваторов частотно-управляемого электропривода весьма рационально [1]. Он обладает более высокими динамическими показателями, чем распространенный сейчас привод постоянного тока, за счет существенно меньшего момента инерции ротора и большего отношения максимального допустимого момента к номинальному. Это обеспечивает более благоприятные условия функционирования механического оборудования благодаря более эффективному ограничению динамических нагрузок.

Асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором - полностью бесконтактная машина, что весьма важно в тяжелых условиях запыленности, вибраций, интенсивных динамических режимов, дефицита технического ухода, в которых работает электрооборудование экскаваторов, ибо, порядка 30% простоев по вине электрооборудования приходится на простоя из-за неисправностей коллекторных машин постоянного тока [2]. Существенно, что АД, так же как и двигатель постоянного тока, естественным образом обеспечивает важное для экскаваторов требование электрического торможения привода при аварийном отключении питания или отказе системы управления.

Потенциальные возможности асинхронного двигателя, в котором процессы электромеханического преобразования энергии принципиально сложнее, чем в двигателе постоянного тока, могут быть реализованы при наличии адекватной системы привода и высококачественной системы управления. Последняя должна обеспечивать, в частности, непрерывное плавное регулирование скорости и момента во всех четырех квадрантах механической характеристики, электрическое удержание ковша в нулевом положении командо-контроллера, надежное ограничение нагрузок при стопорениях и перегрузках, малую инерционность регулирования момента, обеспечивающую надежное ограничение его в динамике. Желательно при этом не использовать трудно реализуемые датчики потока и момента АД. Поскольку приводы карьерных экскаваторов имеют мощности, измеряемые мегаваттами, электромеханическое преобразование энергии должно производиться при высоком к. п. д..

Две системы асинхронного привода обладают свойствами, позволяющими быть использованными в качестве экскаваторных: АИН с ШИМ – АД (автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией – АД) и НПЧ – АД (не-

посредственный преобразователь частоты – АД). Система АИН с ШИМ – АД позволяет получить большой диапазон регулирования скорости, обладает высоким быстродействием, формирует токи и напряжения АД, близкие к синусоидальным, что определяет малые потери в АД. К недостаткам системы АИН с ШИМ – АД следует отнести двукратное преобразование энергии и повышенные потери в инверторе, обусловленные высокой частотой коммутации, а также необходимость второго комплекта выпрямителя для рекуперации энергии торможения в сеть.

Электропривод по системе НПЧ-АД, обладая теми же регулировочными возможностями, что и система АИН с ШИМ – АД, имеет по сравнению с ней преимущества, связанные с возможностью свободного обмена энергией между сетью и АД, что обеспечивает естественное рекуперативное торможение, а также с однократным преобразованием энергии в НПЧ, чем обусловливаются меньшие потери в преобразователе и его лучшие масштабаритные показатели.

Экскаваторный электропривод по системе НПЧ-АД является довольно сложным для анализа и синтеза объектом. Эта сложность обусловлена совместной работой и взаимовлиянием самих по себе непростых объектов - непосредственного преобразователя частоты и асинхронного двигателя, включенных в многоконтурную, многосвязную систему автоматического регулирования, работающих на многомассовую упругую механическую систему с зазорами.

НПЧ включает в себя не менее двух реверсивных управляемых выпрямителей, как правило, с раздельным управлением группами. Специфика их, заключающаяся в дискретном характере управления, неполной управляемости, наличии пульсаций в кривой выходного напряжения, бесстоковой паузе при переключении комплектов, создает трудности при анализе их работы в системах регулирования фазных токов и напряжений. Дополнительные трудности создаются особенностями их работы в составе НПЧ. Эти особенности заключаются в переменности частоты выходных токов, произвольности их отношения к частоте сети, связанной с этим возможностью автоколебаний, переключении дважды за период вентильных групп преобразователей, связанная с этим попаременная работа выпрямителей в режимах непрерывного и прерывистого токов, приводящая к постоянному изменению коэффициента усиления преобразователя, его динамических свойств.

На работе выпрямителей НПЧ сказывается работа АД. Это переменная противо-эдс, наводимая основным потоком в фазах АД - нагрузке преобразователей, изменяющаяся с частотой выходного тока; это взаимовлияние выпрямителей через АД. Сам АД является весьма сложным объектом. Даже при питании от источника синусоидального напряжения он является существенно нелинейной системой, переходные процессы в которой имеют сложный характер. Формирование потока и момента АД осуществляется по одному силовому каналу, а потому взаимосвязано, потому изменение одного из них в общем случае приводит к изменению другого.

Питание АД от НПЧ добавляет свои особенности. Выходное напряжение НПЧ, кроме первой гармоники, содержит их широкий спектр. Это является причиной пульсации фазных токов, а, следовательно, всех фазовых координат АД. Указанное влияние АД на НПЧ и НПЧ на АД является взаимовлиянием, т.е. какое-либо изменение в одной части системы воздействует, в свою очередь, на вызвавший его фактор в другой части. Поэтому правильные результаты может дать только анализ этих частей в совокупности, т.е. как системы. К этому надо добавить, что система НПЧ-АД для экскаваторного электропривода должна быть замкнута по основным координатам. Анализ процессов в такой системе регулирования при учете специфики объекта весьма непрост.

Проведенное рассмотрение основных свойств системы подтверждает мысль о сложности ее анализа. Эта сложность является причиной того, что на сегодняшний день не существует общей теории замкнутых систем НПЧ-АД, отсутствуют общие методы их анализа. Тем более, методы анализа экскаваторного электропривода по системе НПЧ-АД требуют разработки и развития. Кроме методов анализа необходимы и хорошо развитые методы синтеза экскаваторного электропривода по системе НПЧ-АД. Необходимо иметь теоретические методы, позволяющие целенаправленно формировать будущий облик системы, обеспечивать максимальное приближение ее свойств к желаемым.

Анализируя требования к экскаваторному электроприводу [3], можно установить, что удовлетворение их представляет собой нетривиальную задачу. Для успешного решения ее необходимы методы, позволяющие производить анализ процессов, происходящих в системе, а также дающие возможность проектировать электропривод по заданным показателям. Такие методы хорошо развиты в экскаваторном электроприводе постоянного тока, благодаря долгому времени его разработки, эксплуатации и совершенствования [4-14].

Разработанные методы анализа и синтеза экскаваторных электроприводов постоянного тока позволяют, основываясь на понимании физической сущности происходящих процессов, проек-

тировать эффективные системы, удовлетворяющие технологическим требованиям и решающие задачи повышения надежности такие, как ограничение динамических нагрузок, обеспечение максимальной демпфирующей способности электропривода.

Представляется разумным использовать большой опыт по проектированию и исследованию экскаваторных электроприводов постоянного тока при разработке систем переменного тока. Основанием для использования этого опыта является общность физического содержания и математического описания процесса электромеханического преобразования энергии в машинах постоянного и переменного тока [15].

В [5] показано, что при линеаризации уравнений электромеханического преобразователя энергии в окрестности рабочего режима он может быть однозначно описан динамической жесткостью механической характеристики, являющейся передаточной функцией электромеханического преобразователя при входном параметре скорости двигателя и выходном - электромагнитном моменте. Там же показано, что для многих разомкнутых и замкнутых электроприводов динамическая жесткость может быть представлена в виде апериодического звена, в котором коэффициентом усиления выступает статическая жесткость электропривода, а постоянной времени является эквивалентная электромагнитная постоянная.

В [5] выявлено, что ряд свойств электромеханического преобразователя энергии, будь он разомкнутым или замкнутым, переменного или постоянного тока, определяются параметрами динамической жесткости. Они характеризуют динамические свойства электропривода, его электромагнитную инерционность, показатели статических режимов, определяют способность электропривода к демпфированию колебаний в электромеханической системе.

В результате анализа широкого класса существующих экскаваторных электроприводов постоянного тока в [16] было показано, что они могут быть представлены ограниченным числом эталонных динамических жесткостей. Проведенные исследования влияния вида и параметров динамической жесткости на демпфирующую способность электропривода позволили получить универсальные зависимости демпфирования для эталонных упругих электромеханических систем и разработать методику анализа и синтеза экскаваторных электроприводов по критерию минимума колебательности.

При использовании для проектирования экскаваторных электроприводов переменного тока результатов, полученных в терминах динамической жесткости и ее параметров, необходимо решить две взаимосвязанные задачи:

1) определение структуры системы регулирования и настроек регуляторов, обеспечивающих

требуемый вид и параметры передаточной функции динамической жесткости механической характеристики электропривода по системе НПЧ-АД;

2) анализ протекания процессов в существенно нелинейной системе НПЧ-АД, спроектированной по линеаризованным уравнениям.

При решении первой задачи полезно использовать результаты, полученные в теории частотно-управляемого асинхронного электропривода [17-21]. Принципы электромеханического преобразования энергии в асинхронных машинах, целенаправленного воздействия на него, особенности электромагнитных процессов, динамические свойства, типовые структуры систем асинхронного электропривода в ней основаны на методе первой гармоники, который зиждется на представлении, что среднее значение электромагнитного момента и потока АД определяются в основном первой гармоникой питающего напряжения и, соответственно, тока.

В системе НПЧ-АД формирование заданного значения первой гармоники тока статора имеет существенные особенности. Это связано с тем, что преобразователь, формирующий ток в каждой фазе АД, обладает неполной управляемостью, отличается неоднозначностью характеристик при спадании и нарастании управляющего сигнала, как правило, выполнен с раздельным управлением группами, в результате чего имеет бестоковую паузу при переключении комплектов, переходит из режима непрерывного тока в режим прерывистого тока и обратно в течение каждого полупериода выходного тока, что приводит к постоянному изменению коэффициента усиления преобразователя, динамических свойств контура регулирования тока [22,23]. Задача усложняется влиянием на работу системы регулирования тока противо-ЭДС, наводимой в фазе основным потоком, про-

извольностью соотношения частот тока статора и сети, связанной с этим возможностью возникновения автоколебаний.

Кроме задачи формирования токов, обладающих заданной первой гармоникой, важна задача наилучшего приближения формы тока к синусоиде, т.к. всякая несинусоидальность ведет к дополнительным потерям в двигателе, пульсациям электромагнитного момента. Синусоидальность тока может быть охарактеризована его спектральным составом. В связи с этим, а также в связи с необходимостью иметь информацию о гармониках других электрических величин нужно иметь возможность количественно оценивать спектральный состав переменных, его зависимость от управляющих и возмущающих воздействий, параметров режима.

В итоге можно заключить, что наиболее успешным методом анализа и синтеза экскаваторного электропривода по системе НПЧ-АД представляется использование хорошо разработанных методов исследования и проектирования экскаваторного электропривода постоянного тока, основанных на линейных законах систем автоматического регулирования, с применением результатов теории частотно-регулируемого асинхронного электропривода, основанных на методе первой гармоники, при разработке инструмента, осуществляющего двоякую функцию: линеаризацию сложной дискретно-непрерывной нелинейной системы НПЧ-АД и определение спектрального состава её переменных, настройку системы, обеспечивающую минимум отклонения от линеаризованных режимов и максимум содержания первой гармоники - с одной стороны; анализ синтезированных из линейных соображений структур с учетом всех особенностей реальной машинно-вентильной системы - с другой стороны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И., Гаврилов М.П., Каныгин В.И. Проблемы современного электропривода одноковшовых экскаваторов и рациональные пути их решения // Электротехника. 1996. №7. С. 19-23.
2. Гаврилов М.П. Асинхронный частотно-управляемый экскаваторный электропривод // Привод и управление.-Москва. 2004. № 1-2. С.19-23.
3. Гаврилов М.П. Существующие и перспективные системы экскаваторного электропривода // Вестн. КузГТУ . 1999. № 3. С.28-31.
4. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. - М.: Энергия, 1971. 320 с.
5. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. - М.: Энергия, 1979. 616 с.
6. Гаврилов М.П., Данченков А.А., Новиков В.А., Солохненко Р.Г. Безналадочная система управления главными приводами экскаватора по системе ТВ-Г-Д // Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции по электроприводу экскаваторов. - Свердловск, 1989. С. 35-36.
7. Калашников Ю.Т., Вуль Ю.Я., Сапилов А.В. Одноковшовые экскаваторы НКМЗ. - М.: Недра. 1975. 311 с.
8. Симонов Ю.В. Исследование динамических нагрузок электроприводов копающих механизмов одноковшовых экскаваторов. : Авто-реф. канд. дисс. - М.: МЭИ, 1976. 24 с.
9. Волков Д.П. Динамика и прочность одноковшовых экскаваторов. - М.: Машиностроение, 1965. 463 с.

10. Волков Д.П., Каминская Д.А. Динамика электромеханических систем экскаваторов. - М.: Машиностроение, 1971. 344 с.
11. Домбровский Н.Г., Панкратов С.А. Землеройные машины. -М.: Госстройиздат, 1961. - 651 с.
12. Присмотров Н.И. Исследование параметрического резонанса в редукторных электроприводах инерционных механизмов.: Автoref. канд. дисс. - М.: МЭИ, 1975. 34 с.
13. Присмотров Н.И. Оптимизация динамики редукторных электроприводов постоянного тока по критерию минимума колебательных нагрузок. - Тр./Моск. энерг. ин-т, 1975. вып. 223. С.49 - 54.
14. Панченко Б.Я. Исследование и разработка систем управления электроприводами одноковшовых экскаваторов.: Автoref. канд. дисс. Львов.: ЛПИ, 1975. 25 с.
15. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. - М.-Л.: Энергия, 1964. 528 с.
16. Матеев У.А. Исследование динамики упругих электромеханических систем экскаваторных электроприводов поворота. -Дисс. канд. техн. наук. - М.: МЭИ, 1982. 200 с.
17. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. - М.: Энергоиздат, 1982. 192 с.
18. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. - М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
19. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. - М.: Энергия, 1974. 328 с.
20. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. - М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
21. Бродовский В.И., Иванов Е.С. Приводы с частотно-токовым управлением. - М.: Энергия, 1974. 169 с.
22. Булгаков А.А. Основы динамики управляемых вентильных систем. - М.: Издательство академии наук СССР, 1963. 220 с.
23. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. -М.: Наука, 1970. 320 с.

Автор статьи:

Гаврилов  
Михаил Петрович  
- канд.техн. наук, старший научный  
сотрудник, ведущий инженер ООО  
«ЭнергоП», Москва