

Регулируемый электропривод с непрерывным токовым управлением вентильным двигателем

09, сентябрь 2014

Соловьев В. А.

УДК: 62-83.621.313.13

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

SolovjevVA@bk.ru

Введение

В настоящее время в самых разнообразных технических устройствах, включая производственное оборудование, автономные транспортные средства, робототехнику, компьютеры, медицинскую технику, антенные устройства и др., все шире используются вентильные двигатели (ВД) с магнитоэлектрическим возбуждением, обладающие среди электродвигателей основных типов наибольшей надежностью и высокими удельными показателями. ВД представляет собой электромеханическое устройство, состоящее из синхронной электрической машины (ЭМ), полупроводникового коммутатора (ПК) и датчика положения ротора (ДПР), по сигналам которого ПК переключает фазные обмотки ЭМ и формирует в них необходимые токи.

Фазные токи ВД могут формироваться непрерывными [1 - 9] и импульсными [9 - 13] способами. Из них большее распространение, даже в ВД сравнительно небольшой мощности (до 1 кВт), получили импульсные способы формирования фазных токов ЭМ, основывающиеся на использовании принципов релейного регулирования или широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [10 - 13]. Их применение для формирования фазных токов ВД обосновывают относительно небольшими потерями мощности в силовых транзисторах ПК при работе в ключевом режиме. Данное положение справедливо только при сравнительно низкой частоте коммутации силовых транзисторов ПК ВД. Ее повышение с 4 кГц до 12-16 кГц в статических преобразователях частоты, используемых для регулирования частоты вращения электродвигателей переменного тока, приводит возрастанию динамической составляющей мощности потерь в силовых транзисторах преобразователя и вынуждает на (30-50)% снижать его выходной ток [14].

Необходимо также учитывать, что импульсное формирование фазных токов электродвигателей сокращает срок службы изоляции их обмоток, может приводить к разрушению подшипников, сопровождается дополнительными акустическими шумами и гене-

рацией высокочастотных помех большой интенсивности, затрудняющих без тщательного экранирования, фильтрации и заземления электромагнитную совместимость силовой части ВД с его информационными узлами и другими электротехническими системами [15]. Поэтому в ВД, используемых в автоматических системах, в компьютерной технике и даже в вентиляторах приборов, для формирования фазных токов стали применять непрерывные, т.е. аналоговые, способы [2, 3, 5, 6, 8]. Их, в свою очередь, можно разделить на прямые и косвенные.

При косвенных способах на фазные обмотки ВД подаются напряжения определённой формы, которые и задают форму фазных токов и необходимые характеристики электродвигателя [2]. Недостатком этих способов формирования фазных токов ВД является зависимость их формы от ЭДС вращения и индуктивности фазных обмоток и, соответственно, от частоты вращения электродвигателя и его нагрузки.

Более строгое соответствие между выходными напряжениями ДППР и фазными токами ВД обеспечивается при выполнении ПК с отрицательной связью по этим токам [3, 6 - 8]. В таком ПК осуществляется непосредственный контроль текущих значений заданных фазных токов. Поэтому этот способ их формирования может быть назван прямым, а управление ВД, основанное на его использовании, будет непрерывным токовым.

При формировании в секциях фазных обмоток ВД заданных токов прямым непрерывным способом силовые транзисторы ПК работают в активном режиме, характеризующимся по сравнению с ключевым режимом более высокими значениями рассеиваемой в них мощности [16]. Причем в номинальном режиме работы ВД, как показано в [17], потери мощности в его коммутаторе при формировании синусоидальных фазных токов непрерывным и импульсным способами сопоставимы, но с понижением частоты вращения ВД при непрерывном формировании фазных токов потери мощности в силовых транзисторах ПК возрастают и могут достигнуть недопустимых для них значений. Это не только негативно отражается на надежности ВД, но и дополнительно увеличивает его непроизводительное энергопотребление и снижает эффективность происходящего в нем соответствия.

Целью работы является повышение надежности и снижение энергопотребления управляемого электропривода с непрерывным токовым управлением ВД.

Поставленная цель достигается при выполнении регулируемого электропривода с непрерывным токовым управлением ВД в виде двухканальной системы автоматического управления (САУ), в которой по одному из каналов осуществляется управление частотой вращения ВД, а по другому выходным напряжением понижающего импульсного регулятора постоянного напряжения (ИРПН), подаваемым на ПК ВД. В электроприводе во всех режимах работы ВД в соответствии с полученными аналитическими выражениями происходит автоматическое формирование выходного напряжения ИРПН, обеспечивающего на межкоммутационном интервале минимально возможные средние потери мощности в силовых транзисторах ПК.

1. Базовая структура регулируемого электропривода с непрерывным токовым управлением вентильным двигателем

Для формирования прямым непрерывным способом в ВД фазных токов заданной формы силовые транзисторы его ПК на всем межкоммутационном интервале должны работать в активном режиме [7]. Его реализация возможна только при выполнении условия

$$u_{\text{тр}} \geq U_{\text{тр.н}}, \quad (1)$$

где $u_{\text{тр}}$ – напряжение между коллектором и эмиттером силового транзистора; $U_{\text{тр.н}}$ – напряжение между коллектором и эмиттером силового транзистора на границе насыщения.

Условие (1) должно выполняться с небольшим запасом. Тогда силовые транзисторы коммутатора в открытом состоянии будут работать на границе режима насыщения, и потери мощности в них будут соизмеримы с потерями мощности в открытых транзисторных ключах. Для выполнения этого условия при изменении частоты вращения и момента нагрузки ВД необходимо также изменять напряжение питания его ПК с подключенными к нему фазными обмотками. Из этого следует, что источник электропитания ВД с непрерывным токовым управлением должен быть регулируемым и, естественно, обладать высоким КПД. Этим требованиям соответствует понижающий ИРПН [18].

Регулируемый электропривод с непрерывным токовым управлением ВД при регулировании напряжения питания ПК представляет собой двухканальную САУ и содержит два объекта управления, одним из которых является непосредственно ВД, а другим силовая часть понижающего ИРПН [19]. Структурная схема электропривода представлена на рис.1.

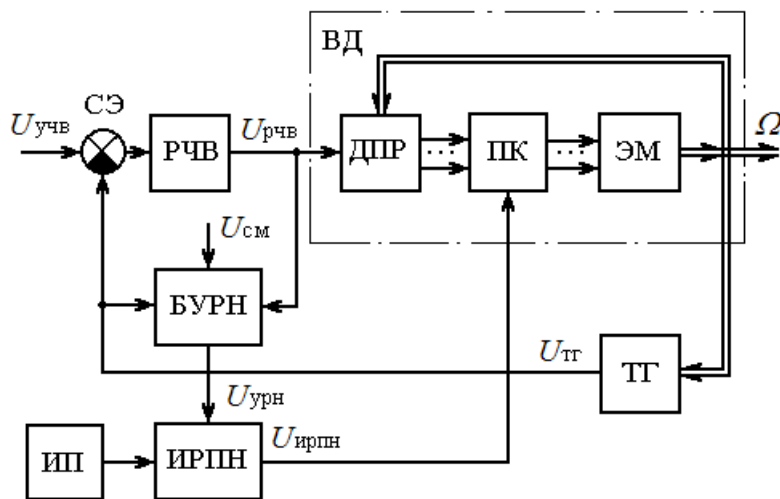


Рис.1. Структурная схема регулируемого электропривода с непрерывным токовым управлением ВД

ВД и силовая часть ИРПН в электроприводе управляются отдельными взаимосвязанными между собой САУ. Первая из них, которая собственно является САУ частотой вращения ВД, имеет обычную для подобных систем структуру и состоит из сравнивающего элемента СЭ, регулятора частоты вращения РЧВ и тахогенератора постоянного тока

ТГ. Задание частоты и направления вращения ВД в ней осуществляется изменением значения и полярности напряжения управления $U_{учв}$. Второй САУ является понижающий ИРПН, регулирующий в следящем режиме напряжение питания ПК ВД $U_{ирпн}$, подаваемое на него от нерегулируемого источника постоянного тока ИП.

Понижающий ИРПН по сути представляет собой трансформатор, только не переменного, а постоянного напряжения, с изменяемым коэффициентом трансформации. Поэтому при регулировании им напряжения питания ПК одновременно с понижением мощности потерь в его силовых транзисторах будет уменьшаться и потребляемая ВД мощность. Из этого следует, что понижающий ИРПН в регулируемом электроприводе с непрерывным токовым управлением ВД выполняет функцию энергорегулирующего элемента.

Выходное напряжение ИРПН $U_{ирпн}$ задаётся напряжением управления $U_{урн}$. Его формирует блок управления регулятора напряжения БУРН из поступающих на его входы напряжений ТГ $U_{тг}$, РЧВ $U_{рчв}$ и напряжения смещения $U_{см}$, пропорциональных составляющим необходимого напряжения питания ВД. Напряжение $U_{тг}$ прямо пропорционально амплитуде фазных ЭДС вращения $E_{с\ max}$, напряжение $U_{рчв}$ прямо пропорционально амплитуде фазных токов $I_{с\ max}$, а напряжение $U_{см}$ соответствует минимально допустимому напряжению $U_{тр.н}$ на силовых транзисторах коммутатора, необходимому для их работы в активном режиме.

Алгоритмы формирования напряжения $U_{урн}$ зависят от режима работы ВД, особенностей ИРПН, а также от структуры БУРН и источников его входных напряжений. Основным критерием при их синтезе принято выполнение с минимальным запасом условия (1) во всех режимах работы ВД: установившемся, при пуске, торможении и реверсе. Следует отметить, что выполнение этого требования из-за нереверсируемости выходного напряжения ИРПН возможно не во всех режимах работы ВД. Поэтому, принимая во внимание, что для ВД основным и наиболее продолжительным является двигательный режим, главной целью ставится обеспечение выполнения условия (1) именно для этого режима его работы.

Условие (1) для силовых транзисторов ПК может обеспечиваться как на всём межкоммутационном интервале ВД, так и на отдельной его части для самых загруженных по току в данный момент силовых транзисторов, или при определённых углах поворота ротора, в которых необходимое напряжение питания ПК ВД должно быть максимально, т.е. при амплитуде фазных ЭДС вращения $E_{с\ max}$ и токов $I_{с\ max}$ [20]. В последнем случае, который является наиболее простым по способу формирования напряжения $U_{урн}$ и универсальным для всех разновидностей ВД с непрерывным токовым управлением, выходное напряжение ИРПН остаётся неизменным на всём межкоммутационном интервале. На таком принципе основано регулирование напряжения питания ПК ВД в исследуемом регулируемом электроприводе. Поэтому его структура, изображенная на рис.1, является базовой для всех регулируемых электроприводов с непрерывным токовым управлением ВД.

2. Синтез необходимого напряжения питания вентильного двигателя в основных режимах его работы

Необходимые выходные напряжения ИРПН для ВД с нереверсивным питанием фазных обмоток в основных режимах работы могут быть определены по схемам замещения цепей питания его секций фазных обмоток, показанным на рис.2. При их составлении ИРПН представлен эквивалентным источником ЭДС $E_{\text{ирпн}} = U_{\text{ирпн}}$ с внутренним сопротивлением, равным нулю, секция фазной обмотки последовательным соединением ее индуктивности L_c , активного сопротивления R_c и источника ЭДС e_c , а силовой транзистор коммутатора идеальным источником тока i_c .

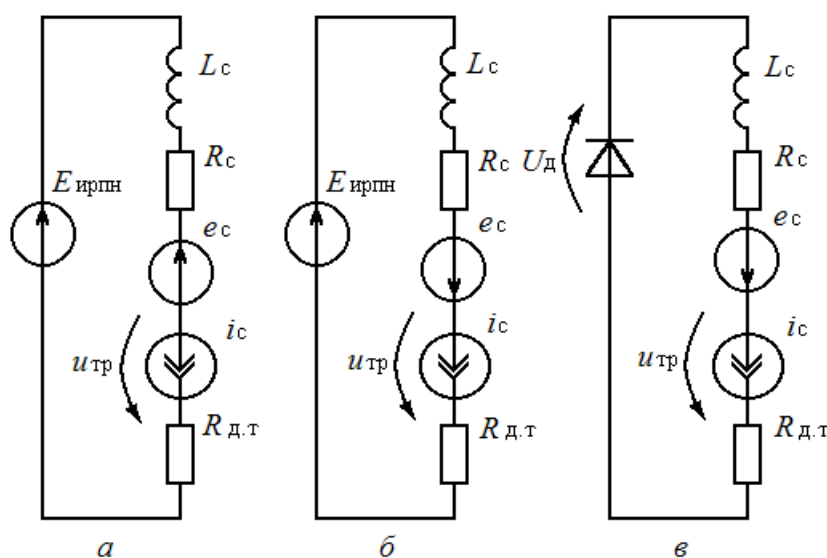


Рис.2. Схемы замещения цепей питания секций фазных обмоток ВД:

а - двигательный режим; б - торможение противовключением; в - динамическое торможение

Двигательному режиму работы ВД, в том числе и при пуске, соответствует эквивалентная схема замещения цепи питания секции фазных обмоток, изображённая на рис.2а. Из неё следует, что минимальное выходное напряжение ИРПН, при котором обеспечивается работа транзисторов коммутатора в активном режиме при амплитуде фазных токов, будет равно

$$U_{\text{ирпн}} = |E_{c \max}| + |I_{c \max}(R_c + R_{\text{д.т}})| + U_{\text{тр.н}}, \quad (2)$$

где R_c - активное сопротивление секции фазной обмотки ВД, $R_{\text{д.т}}$ - сопротивление датчика тока

Точнее учесть влияние на значение $U_{\text{ирпн}}$ изменений зависящей от нагрузки ВД амплитуды фазного тока $I_{c \max}$ можно заменой $U_{\text{тр.н}}$ в (2) выражением

$$U_{\text{тр.н}} = E_{\text{тр}} + R_{\text{тр}} I_{c \max},$$

где $E_{тр}$ – эквивалентная постоянная ЭДС, соответствующая минимальному падению напряжения на открытом силовом транзисторе; $R_{тр}$ – дифференциальное сопротивление открытого силового транзистора,

При скачкообразном уменьшении напряжения $U_{учв}$ или изменении его полярности на противоположную, т.е. при задании более низкой частоты вращения или изменения направления вращения, изменяется полярность напряжения $U_{рчв}$, и ВД его САУ (рис.1) переводит из двигательного режима в режим торможения, при котором фазные токи и ЭДС фазных обмоток совпадают по направлению. В зависимости от текущей частоты вращения ВД будет тормозиться противовключением или посредством динамического торможения. Схема замещения цепей питания секций фазных обмоток при торможении противовключением представлена на рис.2б. Выходное напряжение ИРПН, при котором напряжение на транзисторах коммутатора будет минимальным, в соответствии с этой схемой должно быть равно

$$U_{ирпн} = -|E_{с\max}| + |I_{с\max}(R_c + R_{д.т})| + U_{тр.н}. \quad (3)$$

Если в этот момент ВД будет вращаться с частотой вращения, при которой

$$|E_{с\max}| \geq |I_{с\max}(R_c + R_{д.т})| + U_{тр.н}, \quad (4)$$

то полярность напряжения $U_{урн}$ (рис.1) будет отрицательной. Силовой транзистор ИРПН закрывается, электроэнергия для питания ВД от внешнего источника электропитания ИП не потребляется. ВД будет работать в режиме динамического торможения, т.е. в генераторном режиме, и тормозной момент создаваться за счёт накопленной ротором кинетической энергии. Источниками питания включенных фазных обмоток в этом режиме являются их ЭДС вращения, а контур каждого фазного тока состоит из фазной обмотки, силового транзистора коммутатора, датчика тока, обратного диода ИРПН и его дросселя.

Схема замещения цепи питания секций фазных обмоток при динамическом торможении ВД приведена на рис.2в. Из нее следует, что при динамическом торможении ВД минимальное напряжение на включенном силовом транзисторе коммутатора при пренебрежении падением напряжения на дросселе ИРПН составляет

$$U_{тр.мин} = |E_{с\max}| - |I_{с\max}(R_c + R_{д.т})| - U_d \geq U_{тр.н},$$

где U_d - падение напряжения на обратном диоде ИРПН в проводящем состоянии.

Уменьшение его до $U_{тр.н}$ возможно включением последовательно с обратным диодом ИРПН балластного резистора с присоединённым параллельно ему транзистором, управляемым по принципу ШИМ. Но тогда в фильтре ИРПН должен использоваться конденсатор, допускающий работу при изменении полярности прикладываемого напряжения.

При снижении частоты вращения ВД до значения, не превышающего 0,05-0,2 от номинальной, условие (4) не будет выполняться, и динамическое торможение электродвигателя из-за уменьшающегося тормозного момента будет малоэффективным. Одновременно

с этим становится положительной полярность напряжения $U_{урн}$, и ИРПН начинает работать в своём обычном режиме, формируя напряжение питания коммутатора в соответствии с выражением (3). ВД до полного останова будет работать в режиме торможения противовключением при пониженном напряжении питания, обеспечивающем при амплитуде фазных токов работу силовых транзисторов коммутатора при минимальном, равном $U_{тр.н}$, напряжении на них.

При переводе ВД из двигательного режима в режим торможения под действием активного тормозного момента после перехода частоты вращения через нулевое значение с изменением её направления изменяются на противоположные и направления фазных ЭДС. Этому режиму работы соответствует схема замещения цепей питания фазных обмоток на рис.3б, а выходное напряжение ИРПН определяется из (2). С повышением частоты вращения до значения, при котором будет выполняться условие (3), как показано выше, электрическая машина ВД переходит в режим динамического торможения (рис.2в). Такие режимы работы ВД характерны для электромеханических подтормаживающих устройств, регулирующих натяжение перематываемых материалов.

Помимо рассмотренных тормозных режимов при использовании ПК с обратными диодами и соответствующем изменении силовой части ИРПН возможно осуществление рекуперативного торможения ВД. Анализ особенностей такого торможения ВД и условия его реализации приведены в [10].

Таким образом, при формировании выходного напряжения ИРПН в соответствии с полученными выражениями во всех основных режимах работы ВД с непрерывным токовым управлением при неизменном на межкоммутационном интервале напряжении его питания будут обеспечиваться минимально возможные средние потери мощности в силовых транзисторах ПК. Следует особо подчеркнуть, что во всех тормозных режимах осуществляется управляемое торможение ВД, при котором его электромагнитный момент не зависит от напряжения питания электродвигателя, т.е. от заданного выходного напряжения ИРПН, а определяется заданной напряжением $U_{рчв}$ амплитудой фазных токов.

Заключение

Показано, что управляемый электропривод с непрерывным токовым управлением ВД при использовании понижающего ИРПН для регулирования его энергопотребления представляет собой двухканальную САУ и содержит два объекта управления, одним из которых является непосредственно ВД, а другим понижающий ИРПН. Предложена базовая структурная схема такой двухканальной САУ, являющейся универсальной для всех разновидностей ВД с непрерывным токовым управлением.

Для пускового, двигательного и основных тормозных режимов работы ВД на основе схем замещения цепей питания его фазных обмоток получены аналитические выражения необходимого выходного напряжения понижающего ИРПН, при котором электромеханическое преобразование энергии в ВД происходит при минимально возможных для указанных режимов напряжениях на силовых транзисторах коммутатора. Выполнение этого ус-

ловия обеспечивает минимально возможные средние потери мощности в силовых транзисторах ПК и снижение энергопотребления ВД при его непрерывном токовом управлении.

Список литературы

1. Kröger G. Kollektorlose Gleichstrommotoren // Archiv für technischen Messen (ATM), April 1968. S.79 – 82.
2. Бельский Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. Л.: ЛДНТП, 1987. 28 с.
3. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. 224 с.
4. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат. 1989. 184 с.
5. Боровиков М.А., Доманов В.И., Нашатыркин В.Е. Следящий вентильный электропривод с вычислителями координат по сигналам датчика положения ротора // Электричество. 1990. № 10. С. 76 – 80.
6. Цаценкин В.К. Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями. М.: Изд-во МЭИ, 1991. 240 с.
7. Соловьев В.А. Вентильный электродвигатель с обратной связью по токам фазных обмоток // Электричество. 1995. № 1. С. 56 – 61.
8. Микросхемы для управления электродвигателями. Выпуск 2. М.: ДОДЭКА, 2000. 288 с.
9. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). СПб.: КОРОНА-Век, 2007. 336 с.
10. Розно Ю.Н., Соболев Л.Б. Исследование электрических процессов в бесколлекторных двигателях постоянного тока // Электронная техника в автоматике. 1985. Вып. 16. С. 191 -211.
11. Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 184 с.
12. Padmaraja Yedamale. Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs (AN 899). Microchip Technology Inc., 2003. 20 p.
13. Сизякин А., Румянцев А. Без датчика положения ротора: решение компании IR для управления вентильными двигателями // Новости электроники. 2011. № 10. С. 22 -28.
14. MICROMASTER 410/420/430/440. Стандартные преобразователи частоты от 120 Вт до 250 кВт. Каталог DA 51.2 фирмы Siemens, 2004/2005. С. 2/1 – 2/16.
15. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17 – 2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. Введ. 2011-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 14 с.

16. Коссов О.А. Усилители мощности на транзисторах в режиме переключений. Мю: Энергия, 1971. 432 с.
17. Ланген А М., Соловьев В.А. Анализ эффективности преобразования электроэнергии при импульсном и непрерывном токовым управлении вентильным двигателем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. Спец. вып. «Электротехника и электроника». С. 44 – 55.
18. Соловьев В.А., Бычков В.В. Расчет мощностей потерь в силовых элементах импульсного регулятора напряжения питания вентильного электродвигателя // Электротехника. 1992. № 4-5. С. 58 – 61.
19. Соловьева В.В., Соловьев В.А. Реверсивный вентильный электропривод (варианты): пат. 2142193 Российская Федерация. 1999. Бюл. № 33. 16 с.
20. Соловьев В.А., Князькова Т.О. Анализ эффективности регулирования энергопотребления вентильного двигателя с непрерывным токовым управлением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. Спец. вып. «Электротехника и электроника». С. 65 – 70.