

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Петрушин В.С., д.т.н., проф.

Одесский национальный политехнический университет

Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ОНПУ, кафедра "Электрические машины"

тел. +38(0482) 288-494, E-mail: pvs@ext.ospu.odessa.ua

*Наведено огляд сучасних конструкцій регульованих асинхронних двигунів. Запропоновано раціональний системний підхід при їх проектуванні та оптимізації. Обґрунтована економічна ефективність застосування регульованих асинхронних двигунів в електроприводах з напівпровідниковими перетворювачами.*

*Дан обзор современных конструкций регулируемых асинхронных двигателей. Предложен рациональный системный подход при их проектировании и оптимизации. Обоснована экономическая эффективность применения регулируемых асинхронных двигателей в электроприводах с полупроводниковыми преобразователями.*

Использование регулируемого асинхронного электропривода (РАЭП) во всех отраслях промышленности и на транспорте позволяет рационально управлять технологическими процессами. Поэтому в промышленно-развитых странах около 20% всей вырабатываемой электроэнергии преобразуется в механическую энергию с помощью РАЭП. В настоящее время также широко применяется энергосбережение средствами РАЭП. Например, переход от нерегулируемого ЭП к регулируемому центробежных машин – насосов и вентиляторов (более трети нагрузок приводов) – позволяет экономить до 50% электроэнергии. Кроме того, снижение эксплуатационных расходов, связанных с обслуживанием агрегатов и систем, дает дополнительный экономический эффект. Несмотря на высокую стоимость внедрения, сроки окупаемости регулируемых ЭП за счет экономии электроэнергии, как правило, не превышают трех лет. При массовом внедрении в масштабах Украины экономия может составить  $8 \div 12\%$  от всей вырабатываемой электроэнергии. Таким образом, широкое внедрение регулируемого ЭП дает возможность совершенствовать технологические процессы, обеспечивает комплексную механизацию и автоматизацию производства, способствует повышению качества выпускаемой продукции, снижению её себестоимости, росту производительности труда, повышению надежности и срока службы оборудования.

Поскольку в РАЭП в настоящее время чаще всего применяются асинхронные двигатели (АД) общего применения, рассчитанные на питание от промышленных сетей стандартных напряжений и работу с постоянной скоростью вращения ротора, обоснованный выбор серийных АД для эксплуатации в таких приводах основан на изучении особенностей работы АД в специфичных условиях электропривода. При использовании общепромышленных серийных АД в частотном приводе требуется завышения их установленной мощности, которое зависит, прежде всего, от заданного диапазона регулирования. Из-за высших гармоник (ВГ) напряжения и тока на выходе некото-

рых преобразователей частоты (ПЧ) на 5–6% возрастают потери в двигателе, что тоже требует завышения по мощности АД.

При разработке РАЭП одной из наиболее важных задач является задача выбора АД [1]. Технико-экономические показатели, как самого двигателя, так и привода в целом во многом зависят от того, насколько правильно будет решена эта задача. Из-за сложностей, возникающих при формализации процесса выбора общепромышленных двигателей для работы в составе регулируемых приводов, на сегодняшний день отсутствуют четкие рекомендации по выбору АД для них. Между тем выбор зависит от многих факторов: типа, величины и режима работы нагрузочного механизма привода, требуемого диапазона регулирования, типа полупроводникового преобразователя (ПП), вида регулирования и закона частотного управления, применяемого в нем. При выборе могут использоваться различные критерии, а также должны учитываться требуемые ограничения. Выбор основывается на детальном анализе условий эксплуатации, при совместном рассмотрении работы двигателя, преобразователя и нагрузки. Для этого требуется использование комплексных моделей РАЭП. В программном продукте DIMASDrive [2] обеспечивается формирование моделей основных разновидностей РАЭП. Процесс выбора АД проводится в несколько этапов. На первом этапе в зависимости от характера и величины нагрузки, а также требуемого диапазона регулирования осуществляется выбор двигателя по тепловым и механическим нагрузочным способностям. Следующий этап необходим для уточнения и обоснования выбора, сделанного на основании теплового состояния. Он выполняется по разным технико-экономическим показателям. Критериями могут быть масса, габариты, стоимость двигателя, диапазонные критерии приведенных затрат и энергетических показателей, либо эти критерии сворачиваются в единый скалярный (интегральный) критерий. Если известна временная диаграмма работы привода, то при расчетах диапазонных энергетических крите-

риев двигателей ЭП необходимо принять во внимание различные длительности работы АД на определенных частотах вращения. При оценке стоимостных показателей двигателей целесообразно учитывать влияния на критерий приведенной стоимости инфляционных процессов, поскольку нормативные сроки окупаемости АД достаточно велики (5-7 лет). Результаты выбора изменяются при использовании различного состава частных критериев в обобщенном критерии, а также при изменении коэффициентов значимости этих критериев. Кроме того, при выборе должны учитываться механические, виброакустические и динамические показатели двигателей РАЭД. Проверка выполнения ограничений, прямо не связанных с электромагнитными процессами, осуществляется на заключительном этапе. Можно утверждать, что после выполнения всех вышеперечисленных этапов произведен обоснованный выбор серийного АД исходя из наиболее важных аспектов его функционирования в регулируемом частотном ЭП.

Работа АД в регулируемом ЭП характеризуется существенными особенностями, которые и определяют предъявляемые к ним специфические технические требования [3]. Особенности работы двигателей в РАЭП связаны с изменяющимися в заданных пределах значениями частот вращения двигателя, величин и частот питающего двигателя напряжения или тока, наличием и необходимостью учета временных ВГ. Специфическими являются математические модели электромагнитных, электромеханических, энергетических, тепловентиляционных процессов в установившихся и переходных режимах работы двигателей, расчетов добавочных магнитных потерь, механических и виброакустических показателей [4]. Вместе с тем определено, что в РАЭП необходимо применять специальные регулируемые асинхронные двигатели (РАД) с улучшенными технико-экономическими показателями и эксплуатационными свойствами [5]. Применение РАД вместо общепромышленных АД позволяет значительно снизить массу, габариты и стоимость РАЭП. Автоматизированное проектирование РАД, адаптированных к специфическим условиям работы в РАЭП осуществляется с использованием программного комплекса DIMASDrive. Основными техническими предпосылками, обеспечивающими преимущество адаптированных двигателей над серийными, являются:

- исключение требований к пусковым характеристикам (не ставится задача обеспечения кратностей пускового и максимального моментов), в связи с чем может быть применена соответствующая форма паза ротора (отказ от глубоких пазов), обеспечивающая минимальное активное сопротивление обмотки ротора и меньшую индуктивность рассеяния;
- требуемую частоту вращения производственного механизма, определяемую частотой питания двигателя, числом полюсов обмотки статора АД и передаточным числом редуктора, можно обеспечить при различных сочетаниях этих трех величин;

- возможность некоторого снижения перегрузочной способности АД, поскольку система управления привода отслеживает параметры напряжения или тока питания двигателя;

- использование эффективных систем само- и, при необходимости, принудительного охлаждения с оптимизированной частотой вращения вентилятора;

- возможность выбора оптимального соотношения нестандартных значений напряжения и частоты проектируемого двигателя, отличного от базового и согласованного с номинальными значениями преобразователя, что позволяет снизить массу и габариты;

- усиление электроизоляции витков обмотки статора с целью защиты от импульсных перенапряжений;

- использование соответствующих подшипников с учетом, как высоких скоростей вращения, так и появления паразитных токов от высокочастотной коммутации.

Фирмой Siemens для работы в регулируемом частотном ЭП мощностью от 0,5 кВт до 300 кВт спроектированы двигатели ROTEC (1РА6). В этих РАД высокие быстродействие и перегрузочная способность, низкие моменты инерции, малощумность, хорошая равномерность хода, высокая степень защиты и т.д.[6]. Фирма рекомендует в РАЭП использовать двигатели ROTEC в сочетании с преобразователями SIMOVERT MASTER DRIVES, которые обеспечивают разные виды регулирования (FC – Frequency Control, для регулирования по частоте, VC – Vector Control, для регулирования электромагнитного поля, SC – Servo Control, для регулирования высоко динамичных процессов). Для разных видов регулирования в серии ROTEC предусмотрены соответствующие модификации двигателей.

Одно из предприятий концерна АВВ фирма Normelec AG (Германия) выпускает короткозамкнутые АД типа QU для работы с ПЧ типов ACS. Концерн АВВ производит также РАД SDM 602 (диапазон мощностей 1,1 – 75 кВт, максимальная частота вращения 6000 об/мин) и РАД SDM 605 (диапазон мощностей 2,2 – 90 кВт, максимальная частота вращения 9000 об/мин, диапазон регулирования 1500 – 7000 об/мин). Двигатели выполняются с независимой вентиляцией.

Компания Atlans-Ge Motors (США) выпускает серию двигателей ASD для ЭП с частотными преобразователями. Фирма Бауэр (Германия) предлагает ряд частотно-регулируемых АД мощностью до 75 кВт, совмещенных с редукторами различной конструкции, а также рольганговые с моментом на выходе редуктора до 9000 Нм. РАД производят фирмы Lenze Bachofen (Германия), Мэйдэн (Япония), Leroy Somer (Франция). В частности Leroy Somer выпускает РАД серии LSMV (0,75 – 132 кВт), в том числе с независимой вентиляцией и электромагнитным тормозом. Кроме того, фирма Leroy Somer предлагает потребителю двигатели VARMECA (до 7,5 кВт), объединенные в едином конструктиве с ПЧ. В сочетании с различными редукторами достигается вращающий момент более 3000 Нм. Фирма NORD выпускает NORDAC trio – частотный преобразователь, снаб-

женный цифровым и аналоговым вводами, электродвигатель, редуктор в единой комбинации. Фирма ASI Robicon (Италия) выпускает три серии двигателей, специально разработанных для РАЭП. Серия HS с диапазоном мощностей 500 – 20000 кВт и максимальной скоростью 20000 об/мин для использования на насосных и компрессорных станциях, серия HSMS с диапазоном мощностей 5000 – 35000 кВт и максимальной скоростью 8000 об/мин и серия четырехполюсных двигателей SM/SN с диапазоном мощностей 15 – 700 кВт и напряжением до 660 В.

РАД также выпускают некоторые российские заводы. Широкую номенклатуру частотно-регулируемых АД и комплектных приводов с преобразователями НИТАСНИ предлагает потребителям Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ). Это специальные модификации серий АИР и 5А на все высоты осей вращения 56 - 355 мм, числа полюсов от 2 до 12 и мощностью от 0,18 до 315 кВт. Двигатели укомплектованы встроенными термодатчиками, импульсными датчиками угла поворота ротора и независимым вентилятором. Они дороже обычных: при номинальной мощности до 4 кВт – в 4 раза, а при мощностях свыше 50 кВт – в 20 раз. По желанию заказчика в комплект могут быть включены: специальные подшипники, встроенный электромагнитный тормоз. При малых мощностях преобразователь может быть конструктивно объединен с двигателем. Ротора этих машин балансируются на повышенную частоту вращения, изоляция обмотки статора усилена.

29 типоразмеров частотно-регулируемых двигателей разработало и изготавливает ОАО НИПТИЭМ (г. Владимир):

- типов 4АМФ2П160, 18,5 кВт и 4АМФ2П180, 30 кВт, двухфазных общего назначения;
- типа АДЧ с высотами осей вращения 160-250 мм, на мощности от 10 до 80 кВт, двухфазных с независимой вентиляцией, для кузнечно-прессового оборудования;
- типов АЧ и АЧИ с высотами осей вращения 160-225 мм, на мощности от 7,5 до 45 кВт, трехфазных, с независимой вентиляцией, датчиками температуры и положения ротора, для главных приводов металлообрабатывающих станков;
- типа ДЭШ на мощности от 5,5 до 30 кВт, скорости вращения до 48000 об/мин, трехфазных, встраиваемых в шпиндель.

В рамках новой серии RA Ярославский электромашиностроительный завод (ОАО "ELDIN") предлагает для частотно-регулируемых ЭП двухфазные АД по разработкам ВНИИР (Чебоксары) и специальные модификации двигателей с повышенным скольжением для параметрического регулирования в малых диапазонах 1:3 и 1:4, предназначенные для приводов вентиляционных и насосных агрегатов. Частотные ЭП завод комплектует своими АД общего назначения и преобразователями серии UNI DRIVE фирмы Control Techniques (Англия). Серии ролланговых двигателей – AP и APM, выпускаемые ОАО «Сибэлектромотор»

(Томск), разрабатывались с учетом возможности управления ими от ПЧ. Двигатели серии APM допускают работу от преобразователей в диапазоне 20 – 70 Гц при пропорциональном изменении напряжения и частоты. Сейчас предприятие готово расширить его в пределах 10 – 85 Гц. В серии AP имеется специальное исполнение для работы при напряжении 220 В и частоте 20 Гц, роторы этих машин заливаются чистым алюминием, как и в крановых АД серии 4МТКМ, планируемых для использования в частотных ЭП механизмов передвижения мостовых и козловых кранов. Баранчинский электромеханический завод разрабатывает тяговые АД с частотным регулированием для модернизации трамваев чешского производства «Татра-3», а также планирует производить РАД для троллейбусов. На Сафоновском электромашиностроительном заводе производятся мощные высоковольтные АД для частотных ЭП с автономными инверторами тока. Чебоксарский электроаппаратный завод производит РАД серии ДВА для работы в составе приводов главного движения станков мощностью 5,5 и 7,5 кВт.

РАД могут проектироваться для работы в РАЭП с определенной по характеру и величине нагрузкой с соответствующим законом частотного управления в заданном диапазоне регулирования либо как удовлетворяющие всем характеристикам нагрузок (так спроектированы двигатели серии ROTEC фирмы Siemens [6]). В последнем случае определен диапазон регулирования, в котором обеспечивается постоянство заданной мощности, либо наоборот, может определяться мощность, при которой обеспечивается заданный диапазон регулирования. РАД могут проектироваться в виде серий (как серия ROTEC) либо в виде электрических модификаций серий (как в серии АИ), построенных на базе основного исполнения [7]. Так в рамках разработанной в 1989 г. унифицированной серии АД Интерэлектро была предусмотрена частотно-регулируемая модификация АД двух исполнений, отличающихся различными диапазонами изменения частот вращения. Проектирование модификации осуществлялось в расчете на использование в приводах ПЧ с амплитудным видом регулирования. Однако внедрение этой модификации в производство не состоялось. Переход на использование в ЭП преобразователей с широтно-импульсной модуляцией, а также удовлетворение требования значительных диапазонов регулирования частот, обусловило необходимость нового подхода к проектированию РАД.

В мире растет число проектов, связанных с РАД. Отечественное электромашиностроение также решает аналогичные проекты (разработка тягового двигателя АД-914 первого украинского электровоза ДСЗ) и в будущем предстоит разработки и внедрения в производство РАД. Этому способствуют совершенствование проектных моделей, учет необходимых проектных ограничений, разработка критериев оптимальности для автоматизированного проектного синтеза РАД, формализация и учет ряда проектных факторов

и критериев, совершенствование методов поиска оптимальных технических решений, системная организация технологии процессов автоматизированного проектирования РАД [8], [9], [10].

Из-за существенной специфики работы двигателей в ЭП с ПП к параметрам и показателям РАД предъявляются особые требования. Поэтому задача разработки таких машин переросла в самостоятельную проблему, включающую в себя вопросы, связанные с определением оптимальных параметров двигателей. Для решения задач проектного синтеза и оптимизации РАД необходимо специальное программное обеспечение, отличное от стандартного программного обеспечения для проектирования общепромышленных АД. При проектировании РАД учитываются следующие особенности и требования:

- в системе проектирования используются комплексные ММ, включающие в себя модели всех взаимодействующих компонентов ЭП, а не только модели двигателя, как это делается в системе проектирования общепромышленных АД;
- РАД проектируются не на одну номинальную точку работы, как проектируются АД общепромышленного назначения, а на заданный диапазон регулирования и при их разработке существенно возрастает объем поисковых и поверочных расчетов;
- при проектировании учитывается, что в каждой рабочей точке РАД питается определенным по качественно-количественному составу полигармоническим напряжением или током, зависящим от типа, вида регулирования, закона управления преобразователя, и работает с определенным нагрузочным моментом;
- в разных рабочих точках диапазона регулирования значения параметров схем замещения двигателя, определяемые с учетом вытеснения токов в обмотках и насыщения магнитной цепи машины, различны;
- учитывается изменение тепловых проводимостей эквивалентных тепловых схем замещения РАД ввиду изменения интенсивности охлаждения при регулировании частоты вращения;
- формируется набор специфических критериев оптимальности и проектных ограничений.

Системный подход [11] заключается в рассмотрении РАД во взаимодействии с другими элементами ЭП: силовой преобразовательной частью, системой управления и регулирования, исполнительным органом рабочей машины. Эффективность системного подхода при проектировании РАД основывается на учете особенностей отдельных составляющих ЭП, характера отношений и связей между этими составляющими. Благодаря этому значительно повышаются адекватность ММ и, соответственно, качество проектного синтеза РАД. На основе системного подхода рассматриваются все наиболее важные для проектного синтеза аспекты устройства и функционирования РАД и он дает возможность осуществить:

- комплексный учет всей необходимой совокупности проектных факторов в их взаимосвязи и взаимовлиянии;

- разработку и применение адекватных ММ, учитывающих изменение параметров во всем диапазоне регулирования, и другие особенности работы РАД в регулируемом ЭП;

- обоснование и применение рациональной декомпозиции проектной ММ и модели объекта проектирования, процессов проектного синтеза и оптимизации;
- реализацию эффективных методов оптимизации;
- системную организацию технологии процесса проектного синтеза РАД.

При проектировании РАД для приводов с ПП используются те же критерии, что и при выборе серийных АД для этих приводов. Особенным является определение диапазонных критериев оптимальности – энергетических показателей и приведенные затраты двигателя [12],[13]. Они должны рассматриваться в виде эквивалентных усредненных значений для определенного заданного диапазона регулирования. В связи с тем, что за время службы двигателя (10-20 лет) энергетическая составляющая критерия приведенных затрат в десятки раз превысит составляющую, связанную с капитальными затратами, вопрос об оптимизации именно энергетической составляющей является особенно важным. При этом следует учитывать неоднозначность последствий повышения КПД и коэффициента мощности: снижение стоимости активных потерь в 10 раз эффективней снижения стоимости компенсации реактивной энергии.

Задача адаптации электромашинной части РАЭП к специфическим условиям работы должна решаться как задача структурно-параметрической оптимизации. Трудоемкость задачи проектирования обусловлена не только необходимостью формирования множества рациональных структур РАД, но и необходимостью решения задачи параметрической оптимизации для каждой сформированной структуры. По своей направленности задачи структурного синтеза можно разделить на внутренние (относящиеся к двигателю) и внешние (относящиеся к системе привода). Задачей параметрической оптимизации является определение такого набора значений управляемых переменных некоторой сформированной структуры электропривода и входящего в него РАД, при котором целевая функция имеет наилучшее значение [14]. При этом должны выполняться все требования и ограничения, оговоренные в задании на проектирование. Множество структур РАД с оптимизированными параметрами является информационным базисом для выбора оптимального варианта РАД.

Системный подход предусматривает рассмотрение всех аспектов функционирования РАД. Поэтому при проектно синтезе РАД используется ряд подсистем, с помощью которых осуществляются поверочные расчеты. К их числу относятся расчеты механических и виброакустических показателей, неустановившихся режимов работы. Проектные ММ подсистем так же, как и модели оптимизационно-поисковых расчетов, являются комплексными, составленными из ММ входящих в привод элементов, и

в них выполняется учет рассмотренной выше специфики. При наличии в техническом задании на проектирование РАД активных ограничений, прямо не связанных с электромагнитными, электромеханическими, тепловыми процессами, задача условной оптимизации решается на основе сочетания методов уступок по критериям и релаксации ограничений.

Исходя из вышесказанного, использование информационных технологий автоматизированного проектного синтеза, прикладного математического и программного обеспечения DIMASDrive позволяет реализовать проектирование серий РАД на основе тщательного анализа рынка потребления; разработку РАД для использования в регулируемых электроприводах конкретных электромеханических систем [15]; дизайн АД [16], использующихся в настоящее время в определенных РАЭП с целью их адаптации к специфическим условиям работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин В.С. Поэтапный выбор серийных асинхронных двигателей для систем частотного электропривода // Техн. электродинамика: Тематич. Вип. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч.3. – К.: Ін-т електродинаміки АН України, 2002, - с. 41 – 44.
2. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт “DIMASDrive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА №4065). Киев: Министерство образования и науки Украины, Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
3. Курбасов А.С. Особенности проектирования частотно-управляемых асинхронных двигателей // Электротехника. – 1990. – № 9. – С. 29 – 33.
4. Bepalov V.Y. Problems of theory, simulation and design of electric machines working in systems with semiconductor converters. // 5<sup>th</sup> International conference UEES'01, Miedzyzdroje, Poland, 05-08 Sept. 2001, pp. 147 – 154.
5. Z.M. Zhao, C.C. Chan, E.W.C. Lo, “A novel induction machine design suitable for inverter-driven variable speed systems”, IEEE Trans. On Energy Conversion, vol.15, No.4, Dec.2000, pp. 413-420.
6. Кизлер А. Эволюция в моторостроении. ROTEC – прогрессивные двигатели для работы с преобразователями мощностью от 0,5 кВт до 300 кВт // drive & control. SIEMENS. – 1996. – Специальный выпуск для ЭЛЕКТРО'96. – С. 6 – 7.
7. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоиздат, 1990. – 374 с.
8. Петрушин В.С. Проектный синтез частотно-регулируемых асинхронных двигателей // Вест. Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – Выпуск 84. – С. 157 – 160.
9. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Проектирование модификаций асинхронных короткозамкнутых двигателей для систем полупроводникового электропривода // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Харьковск. гос. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 61. – С. 196 – 197.
10. Петрушин В.С. Система проектирования регулируемых асинхронных двигателей // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2002. – Вип.4(50). – С. 114 – 117.
11. Петрушин В.С. Системный подход при проектировании регулируемых асинхронных двигателей // Труды 5-й Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», – 2003. – Ч.1 – С. 357 – 360.
12. Петрушин В.С. Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2001. – Вып.1(13). – С. 81 – 86.
13. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід.наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51 – 54.
14. Петрушин В.С. Оптимизация обмоточных данных частотно-регулируемых асинхронных двигателей // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – 2002. – Вип. 12. – Том 1. – С. 242 – 245.
15. Пуйло Г.В., Петрушин В.С., Якимец А.М. Проектирование регулируемых асинхронных двигателей для циклических нагрузок // Електротехніка і Електромеханіка. – 2002. – №3. – С. 68 – 69.
16. Пуйло Г.В., Петрушин В.С., Якимец А.М. Ресурсо и энергосберегающий редизайн асинхронных электродвигателей // Материалы международной научно-технической конференции “Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах”. – Севастополь. – 2003. – С. 74 – 75.

Поступила 25.08.2005