

В статье рассматриваются этапы создания электродвигателей с регулируемой частотой вращения.

История создания преобразователей частоты.

Часть 1

Юрий Чернихов, г. Днепр

Система трёхфазных токов М.О. Доливо-Добровольского

После изобретения сербским инженером и ученым Николой Тесла вращающегося при помощи переменных токов магнитного поля и создания двухфазного индукционного двигателя значительный вклад в развитие техники многофазных токов (в первую очередь — трехфазных) принадлежит русскому инженеру Михаилу Осиповичу Доливо-Добровольскому (рис.1) (далее Д-Д). Д-Д большую часть своей жизни провел в Германии, занимая руководящие должности в концерне AEG в Берлине, где он сделал серию изобретений, относящихся к системе трехфазных токов, ставших главным делом его жизни.



Рис.1

Первым шагом Д-Д в области техники трехфазных токов было создание конструкции короткозамкнутого ротора для двигателя переменного тока. Рассматривая двухфазный индукционный двигатель, Д-Д отметил, что в нем индуцированные в медном цилиндре токи взаимодействуют с вращающимся магнитным полем. Но медь плохой проводник для магнитного потока, поэтому КПД двигателя будет низким. Если же медный цилиндр заменить стальным, то магнитный поток резко возрастет, но сталь будет плохим проводником для индуцированных в роторе токов. Поэтому в качестве выхода из этого противоречия Д-Д предложил выполнить ротор в виде стального цилиндра (что ведет к уменьшению магнитного сопротивления ротора), а в просверленные по периферии цилиндра отверстия закладывать медные стержни (что ведет к уменьшению электрического сопротивления ротора). На лобовых частях ротора эти стержни должны быть хорошо электрически соединены друг с другом. Так появилась обмотка ротора, получившая название «белычья клетка». Такие конструкции роторов асинхронных двигателей (рис.2) широко применяются и в настоящее время.

В результате исследования различных схем обмоток Д-Д сделал ответвления от трёх равноотстоящих точек якоря машины постоянного тока. Таким образом была получена система

ма трёх токов с разностью фаз 120 эл. град., позволяющая создать вращающееся магнитное поле. Д-Д показал, что эта система токов обладает замечательным свойством — сумма всех трёх токов в такой связанной цепи в любой момент времени равна нулю. В каждый момент времени один из проводов (меняющийся периодически) является обратным проводом для двух других токов. Это позволяет для трёхфазной системы применять всего лишь три проводника, соединяющие генератор и двигатель, т.е. соединять их по схеме «треугольник».

В период 1888 — 1891 г.г. Д-Д построил:

- трехфазные одноякорные преобразователи и синхронные генераторы;
- трехфазные трансформаторы и асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным роторами.

А также исследовал трехпроводные и четырехпроводные цепи трехфазного тока.

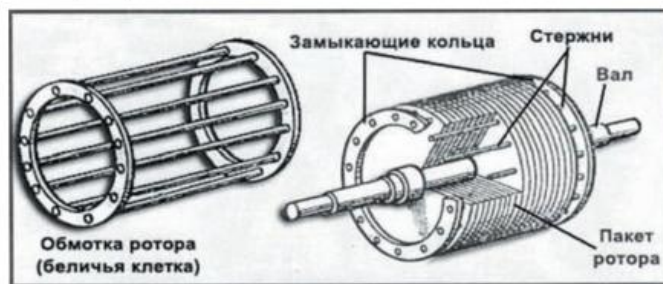


Рис.2

Это была вновь созданная область электротехники. Д-Д разработал все основные элементы этой комплексной системы и довел её до практического исполнения и внедрения в промышленность в чрезвычайно короткие сроки.

Изобретение трехфазного асинхронного двигателя (рис.3) ознаменовало собой начало нового этапа в развитии электропривода. Вскоре этот тип электродвигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. Трехфазный ток оказался весьма удобным для передачи энергии на большие расстояния, и получил всеобщее признание благодаря высоким качествам электродвигателей. Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, позволяет устанавливать в каком-либо цехе сотни и тысячи таких двигателей, почти не требующих обслуживания.

Сначала асинхронные электродвигатели устанавливались для привода отдельных машин и станков. Затем в старых цехах стали заменять паровые машины, приводящие в движение трансмиссии, электродвигателями. Так возник групповой электропривод, который сохранял многочисленные трансмиссии и подчинял характер работы исполнительных механизмов характеру работы центрального приводного электродвигателя. Постепенно практика привела к признанию целесообразности одиночного электропривода. Этот вид привода освобождает промышленное предприятие от трансмиссий и, главное, позволяет работать каждому отдельному механизму при наивыгоднейших скоростях, а также позволяет ускорить процесс пуска в ход и в реверс.

Однако, короткозамкнутый асинхронный электродвигатель, при всех своих достоинствах, при питании от сети стандартной частоты оставался двигателем с постоянной скоростью вращения. Возникла проблема регулирования их скорости.

Регулирование скорости электроприводов с асинхронными двигателями

1. Переключение числа пар полюсов

При изменении числа пар полюсов обмотки статора асинхронного двигателя изменяется скорость вращения магнитного поля статора и, следовательно, скорость вращения ротора. Создавая свой первый трехфазный асинхронный двигатель с ротором типа «беличья клетка», Д-Д при помощи переключений частей обмотки делал машину двух или четырёхполюсной [1]. Число пар полюсов может быть только целым, поэтому изменение скорости вращения двигателя может быть только ступенчатым. Вторым путем изменения числа полюсов является расположение в пазах статора асинхронного трехфазного двигателя двух отдельных, независимых друг от друга обмоток с различными числами полюсов. Подключая к сети ту или иную обмотку, получают различные скорости вращения ротора. Электромашиностроительные заводы в СССР выпускали двух – трех – и четырехскоростные асинхронные двигатели с одной и двумя обмотками на статоре. При двух независимых обмотках на статоре, с переключением числа полюсов 2:1, можно получить четыре разные скорости, например, 3000 (1500) об/мин. и 1000 (500) об/мин. Многоскоростные асинхронные электродвигатели нашли применение в машинах, выполняющих несколько операций и которые могут иметь привод со ступенчатым регулированием скорости. В том числе: в ряде металлорежущих и деревообрабатывающих станков, грузовых и пассажирских подъемников домов средней и малой этажности, лебедках нефтяных скважин и ряде других механизмов.

2. Введение сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя

Выполняя свои исследования Д-Д определил, что короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя в момент его пуска ведет себя, как трансформатор в режиме КЗ. При этом в цепи ротора протекают очень большие токи. Намагничивающая сила ротора в этом случае становится такой по величине, что почти полностью уравнивает намагничивающую силу статора и потребляемый при этом из сети большой ток тратится почти исключительно на создание полей

рассеяния. Установив, что «слишком короткое» замыкание обмотки ротора чрезвычайно сильно понижает пусковой момент Д-Д провел ряд экспериментов с двигателем, у которого менялось число витков, т.е. её сопротивление. Возникло противоречие – при большом сопротивлении обмотки ротора двигатель обладал хорошими пусковыми свойствами, но пониженными рабочими, а при малом сопротивлении резко ухудшались пусковые свойства, но рабочие характеристики были отличными.

Анализ возникших затруднений подсказал Д-Д выход из этого противоречия. Он пришел к мысли создать «переменную степень короткого замыкания». Эта идея была реализована в изобретении фазного ротора с кольцами и пусковыми устройствами (рис.4). В описании Д-Д говорится, что в цепь ротора можно ввести активное сопротивление в виде жидкости, ламп накаливания или металлического реостата. Регулируя таким образом ток в цепи ротора, можно не только создать наилучшие условия для пуска двигателя, но в широких пределах регулировать его скорость. Уместно отметить, что необходимость иметь при ре-



Рис.3

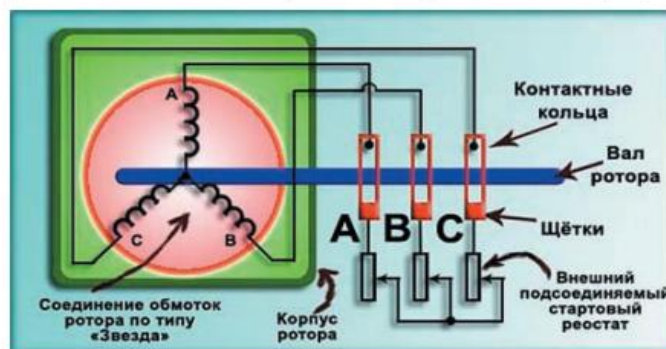


Рис.4

остатном пуске на валу двигателя контактные кольца несколько снижала достоинства индукционного двигателя даже независимо от того, что реостат работал только в течение пуска, после чего роторная обмотка замыкалась накоротко. Однако в течение большей половины 20 столетия отсутствовало более совершенное и простое устройство для пуска асинхронных двигателей большой мощности, чем реостат в цепи ротора.

К достоинствам данного способа регулирования скорости относятся простота и относительно малые затраты.

Однако ему свойственны существенные недостатки:

- зависимость диапазона регулирования скорости от нагрузки, который суживается при ее уменьшении;
- уменьшение жесткости механической характеристики с увеличением сопротивления в цепи ротора;
- снижение КПД привода при регулировании скорости, так как значительная часть мощности тратится в регулирующем реостате.

Данный способ регулирования скорости используется в тех случаях, когда продолжительность работы с пониженной скоростью невелика и не требуется высокой точности регулирования скорости.

3. Использование каскадных установок

Для осуществления плавного и экономичного регулирования скорости неревверсивных приводов средней и большой мощности были предложены различные каскадные установки. В таких установках асинхронный двигатель с фазным ротором соединяется с другими электрическими машинами или вентильными преобразователями, при помощи которых осуществляется регулирование скорости. В отличие от реостатного регулирования, при котором энергия скольжения теряется в сопротивлениях, в каскадных установках она используется рационально.

Различают два типа каскадных установок [2, 3]:

- электромеханический каскад, в котором электрическая энергия скольжения преобразуется в механическую и передается на вал асинхронного двигателя (каскад Кремера);
- электрический каскад, в котором электрическая энергия скольжения после преобразования возвращается в электрическую сеть (каскад Шербиуса).

Принцип действия каскадных установок основан на введении в ротор асинхронного двигателя добавочной э.д.с. той же частоты, что и индуцируемая э.д.с.

Диапазон регулирования в каскадных установках не превышает 2:1. При более глубоком регулировании значительно возрастает суммарная мощность установки. Поэтому к середине 20 века сложные и дорогостоящие каскадные регулируемые установки, которые ограниченно применялись в промышленном производстве, утратили свое значение.

4. Изменение частоты питающего тока

В 1925 году будущий советский академик М. П. Костенко (рис.5) опубликовал статью, в которой были изложены



Рис.5

основы теории работы асинхронного двигателя и в которой впервые изменение частоты рассматривалось как метод регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей. Костенко математически вывел следующее общее положение — для обеспечения требуемых значений пускового момента и коэффициентов устойчивости, мощности и полезного действия необходимо одновременно с регули-

рованием частоты определенным образом изменять и напряжения, подводимые к зажимам питания электродвигателя.

Общие закономерности регулирования скорости асинхронного двигателя изменением частоты источника питания были исследованы Костенко при различном характере изменения статического момента нагрузки (момент на валу постоянен, момент на валу изменяется обратно пропорционально частоте, момент на валу пропорционален квадрату частоты, например в приводе гребных винтов).

В 1906 году немецкий электротехник и изобретатель Артур Шербиус предложил явно полюсную трёхфазную компенсированную коллекторную машину с синусоидально распределенным вращающимся полем, возбуждаемую трёхфазным переменным током. Машина приводилась во вращение электрическим двигателем. При работе в качестве трёхфазного генератора переменного тока (старое название «альтернатор») на зажимах главной трёхфазной рабочей цепи будет действовать э.д.с., пропорциональная потоку возбуждения и скорости вращения, частота её при всех прочих условиях равна частоте тока возбуждения. Альтернатор также имел дополнительные полюса с обмотками, которые обеспечивали относительно хорошую коммутацию.

В 1916 году инженер Н.С. Япольский, выпускник Петербургского Технологического института, предложил применить многофазный коллекторный альтернатор с круговым вращающимся полем для питания ударных машин его системы (электрические молоты, копры и т.д.).

М. П. Костенко, в то время студент Петербургского Политехнического института, принимая с самого начала участие в разработке идеи коллекторного альтернатора для этой цели, пришел к выводу, что такой альтернатор с вращающимся полем сможет найти применение и для питания больших асинхронных двигателей, работающих при переменной скорости (шахтные подъемники, дизель — электровозы, гребные винты и т.д.).

Костенко и Япольский предложили неявнополюсную трёхфазную компенсированную коллекторную машину с распределенной обмоткой возбуждения. По принципу действия эта машина была аналогична машине Шербиуса но лишена добавочных полюсов. Было также предложено подключить к альтернатору, вращающемуся с постоянной скоростью, агрегат для его возбуждения, состоящий из:

- синхронного генератора, возбуждающего альтернатор;
- двигателя постоянного тока, приводящего в движение синхронный генератор.

Изменение числа оборотов этого вспомогательного двигателя и изменение возбуждения синхронного генератора должны были изменять частоту и величину напряжения на выходных зажимах многофазного коллекторного альтернатора с целью изменения скорости вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя. Такой альтернатор был построен и успешно испытан в Электромашинной Лаборатории Политехнического института.

Таким образом, теоретические основы оптимального частотного управления асинхронным приводом были успешно разработаны, и началась техническая реализация этих идей.

Литература:

1. Веселовский О.Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский. — М. — Л.: ГЭИ, 1958. — С.76.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2, Машины переменного тока, изд. третье. — Л.: «ЭНЕРГИЯ», 1973. — С.615 — 621.
3. Полтава Л.И. Основы электропривода. — М.: «НЕДРА», 1970. — С.110.

(Продолжение следует)