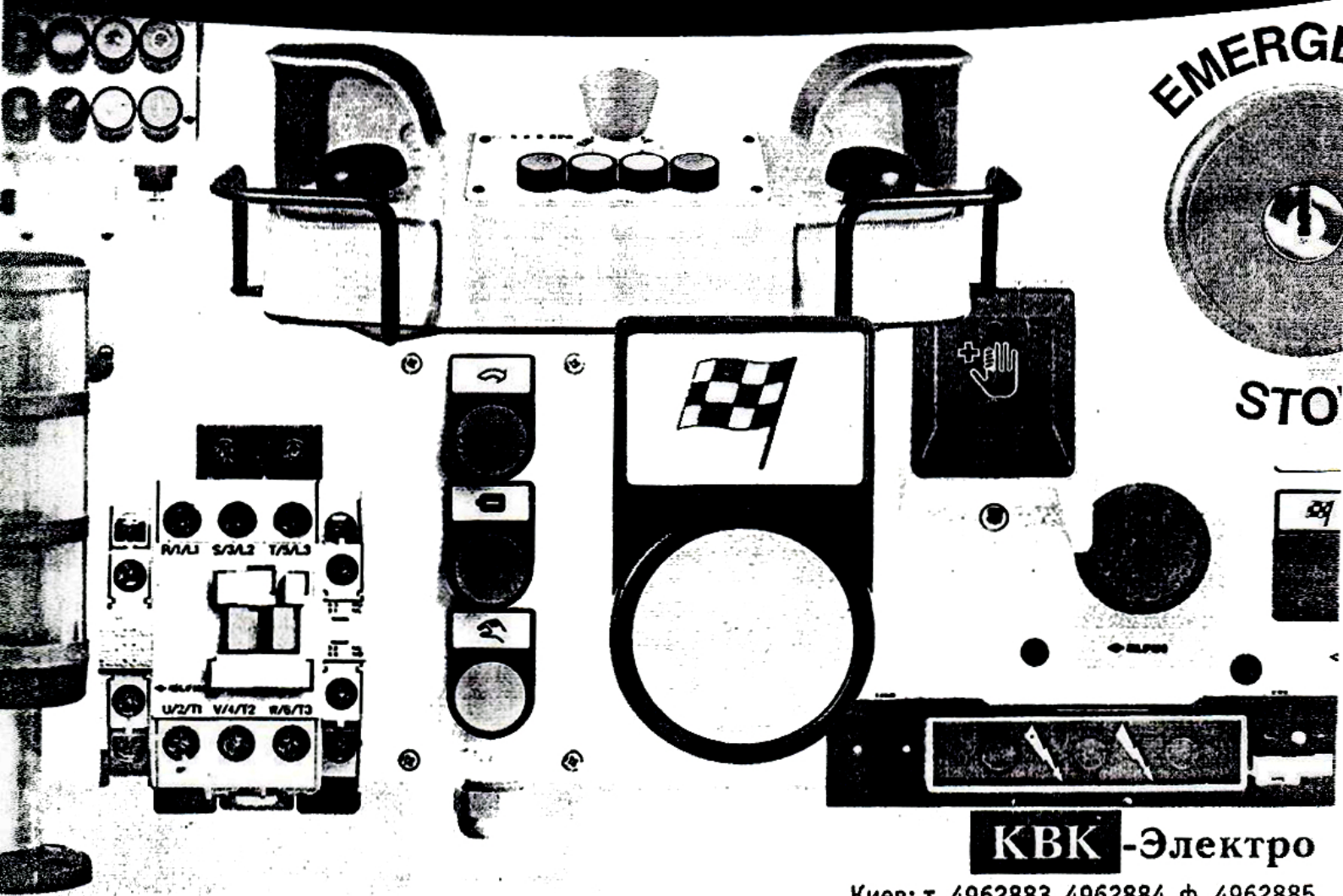


ЭЛЕКТРО панорама

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ И СИГНАЛИЗАЦИИ
СТАЛ ЕЩЕ ДОСТУПНЕЕ!

НА ПОПУЛЯРНЫЕ ПОЗИЦИИ
ЦЕНЫ СНИЖЕНЫ ДО - 30%!



КВК - Электро

Киев: т. 4962883, 4962884, ф. 4962885
www.kvk-electro.com.ua

г. Киев
г. Днепропетровск
г. Запорожье
г. Ивано-Франковск
г. Донецк
г. Львов
г. Одесса
г. Ровно
г. Харьков

ООО «Галант пол электра»
ООО «Монада»
ООО «Монада»
ВПКФ «Электробудкомплект»
ООО «Радиокомплект»
ООО «Макком»
ЧП «Юмис-Н»
ООО «Диабекс»
ООО «Ампер-Харьков»

ул. Ярославская, 32/33
ул. Ломанная, 19, 5-й этаж
ул. Победы, 131 оф. 301
ул. Пивденный бульвар, 35А
ул. Куйбышева, 143 Г
ул. Наукова, 7А, оф. 112
ул. Осипова, 19-12А
ул. Боярка, 40-А, к. 25
пр. Гагарина, 1, оф. 112

(044) 239-17-97 т/ф.
(056) 744-05-16
(061) 2200050, 13-55-70
(0342) 559414, 559420
(062) 385-49-29, 385-49-30
(0322) 652666, 652667
(0482) 345356, 345728
(0362) 628328, 58398
(0577) 177596



Трудный путь инвертора

Ю.В. Черников

После изобретения итальянским физиком Галилео Феррарисом и сербским инженером и ученым Николой Тесла (независимо друг от друга) 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. Большую часть своей жизни Доливо-Добровольский провел в Германии, занимая руководящие должности в электротехническом концерне AEG в Берлине. В стенах этой фирмы им была сделана целая серия изобретений, относящихся к системе трехфазного тока и ставших главным делом его жизни. В период 1888 – 1891 гг. М.О. Доливо-Добровольский построил трехфазные одноякорные преобразователи и синхронные генераторы, трехфазные трансформаторы и асинхронные двигатели с короткозамкнутыми и фазными роторами, исследовал трехпроводные и четырехпроводные цепи трехфазного тока и в заключение разработал основные положения теории переменного тока. Это была совершенно новая область электротехники. Достижения этого талантливого изобретателя представляли собой результат кропотливой, напряженной, ежедневной работы. Немного было в истории техники таких изобретателей, которые подобно М.О. Доливо-Добровольскому разработали бы все основные элементы новой комплексной системы и довели ее до практического исполнения и внедрения в промышленность в чрезвычайно короткие сроки. Основное направление работ М.О. Доливо-Добровольского совпадало с главным направлением в развитии электротехники. Следует также отметить, что он работал в условиях наиболее развитой в то время немецкой электротехнической промышленности и, являясь одним из технических руководителей

крупнейшей фирмы, располагал большими возможностями для экспериментальных исследований и практической реализации своих изобретений.

Изобретение трехфазного асинхронного двигателя ознаменовало собой начало нового этапа в развитии электропривода. В достаточно короткий срок этот тип электродвигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. Трехфазный ток оказался весьма удобным для передачи энергии на большие расстояния, но даже независимо от этого, трехфазный ток получил всеобщее признание благодаря высоким качествам электродвигателей. Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, позволяет устанавливать в каком-либо цехе сотни и тысячи двигателей, почти не требующих никакого ухода. Асинхронные двигатели без вреда выдерживают значительные кратковременные перегрузки, тогда как в двигателях постоянного тока любая перегрузка разрушительным способом сказывается на коллекторе.

Сначала асинхронные электродвигатели устанавливались для привода отдельных машин и станков большой мощности. Затем в старых цехах стали заменять паровые машины, приводившие в движение трансмиссии, электродвигателями. Так возник групповой электропривод, который сохранял многочисленные трансмиссии и подчинял характер 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 наиболее выгодных скоростях, а также позволяет ускорить процесс пуска в ход и реверса.

Однако короткозамкнутый асинхронный электродвигатель, при всех своих достоинствах, при питании от сети стандартной частоты оставался двигателем с постоянной скоростью. Вот почему техническая мысль почти сразу же после освоения асинхронных электродвигателей была занята проблемой регулирования скорости трехфазных асинхронных электродвигателей при сохранении всех их преимуществ.

Были разработаны следующие основные методы регулирования скорости электроприводов с асинхронными двигателями, а именно:

- переключение числа пар полюсов;
- введение в цепь ротора сопротивления;
- использование каскадных установок;
- изменение частоты питающего тока.

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 «белочье колесо», М.О. Доливо-Добровольский при помощи переключений частей обмотки делал машину двух- или четырехполюсной [1]. Число 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 различным количеством полюсов. Подключая к сети ту или иную обмотку, получают соответствующие скорости вращения ротора. Электромашиностроительные заводы в СССР выпускали двух-, трех- и четырехскоростные асинхронные двигатели с одной и двумя обмотками на статоре [2]. При двух независимых обмотках на статоре (с переключением числа полюсов каждой 2:1) можно получить четыре разные

скорости, например, 3000 (1500) и 1000 (500) об/мин. Многоскоростные асинхронные электродвигатели нашли применение в машинах, выполняющих несколько операций и которые могут иметь привод с дискретным ступенчатым регулированием скорости. К подобным машинам относятся: ряд металлорежущих и деревообрабатывающих станков, грузовые и пассажирские подъемники домов средней и малой этажности, лебедки нефтяных скважин и ряд других механизмов.

Выполняя свои исследования, М.О. Доливо-Добровольский определил, что короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя в момент его пуска ведет себя, как трансформатор в режиме короткого замыкания. В цепи ротора наводятся большие электродвижущие силы, а следовательно, протекают очень большие токи. Намагничивающая сила ротора в этом случае принимает такие размеры, что почти полностью уравнивает намагничивающую силу статора и потребляемый при этом из сети громадный ток тратится почти исключительно на создание полей рассеяния. Установив, что «слишком короткое» замыкание обмотки ротора чрезвычайно сильно понижает пусковой момент, М.О. Доливо-Добровольский провел ряд экспериментов с двигателем, у которого менялось число витков, практически менялось 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 М.О. Доливо-Добровольскому 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. В декабре 1890 г. М.О. Доливо-Добровольский сделал на это изобретение патентные заявки в Швейцарии и Англии. В описании изобретения (патент Швейцарии) 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 и практически в произвольных пределах регулировать его скорость (вниз от синхронной скорости) [1]. Уместно отметить, что необходимость иметь при реостатном пуске на валу двигателя контактные кольца несколько снижала достоинства ин-

дукционного двигателя даже независимо от того, что реостат работал только в течение пуска, после чего роторная обмотка замыкалась накоротко. Однако на протяжении большей части XX столетия отсутствовало более совершенное и простое устройство для пуска асинхронных двигателей большой мощности, чем реостат в цепи ротора.

Рассмотрим физическую сторону процесса при регулировании скорости изменением активного сопротивления в роторе. В первый момент времени после введения регулировочного реостата, когда скорость вращения двигателя еще не успевает измениться, ток в роторе уменьшается, вследствие чего уменьшается вращающийся момент двигателя и на валу возникает отрицательный динамический момент. Скорость вращения двигателя начинает уменьшаться, а э.д.с. и ток в роторе увеличиваются. Этот процесс идет до тех пор, пока ток в роторе не достигнет такого значения, при котором вращающий и статический нагрузочный моменты взаимно уравниваются.

К достоинствам данного способа регулирования скорости относятся простота и относительно малые капитальные затраты. Однако ему свойственны существенные недостатки:

- зависимость диапазона регулирования скорости от нагрузки (диапазон суживается при уменьшении нагрузки);
- уменьшение жесткости механической характеристики с увеличением сопротивления в цепи ротора;
- снижение к.п.д. привода при регулировании скорости, так как значительная часть мощности тратится в регулировочном реостате.

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

Для осуществления плавного и экономного регулирования скорости реверсивных 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 рационально используется.

Различают два типа каскадных установок [3, 4]:

- 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.

В состав указанной выше электромеханической каскадной установки входят асинхронный двигатель с фазным ротором, вспомогательный двигатель постоянного тока, вал которого сочленен с валом асинхронного двигателя, и преобразователь энергии скольжения, в качестве которого используется однофазный преобразователь переменного тока в постоянный или управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме.

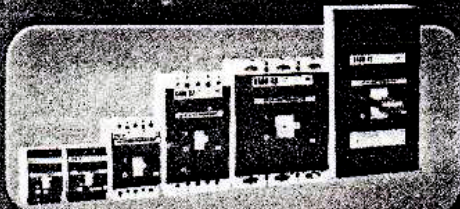
При работе каскада мощность со стороны ротора частоты скольжения подводится к преобразователю, преобразовывается в нем и передается двигателю постоянного тока, который передает ее в виде механической мощности на вал асинхронного двигателя. Регулирование скорости производится изменением тока возбуждения двигателя постоянного тока. При условии, что статический момент нагрузки постоянен, ротор асинхронного двигателя вращается со скоростью W_1 . Если увеличить ток возбуждения, то возрастет э.д.с. двигателя постоянного тока, а так как она является противоположно направленной э.д.с. (по отношению к выпрямленному напряжению преобразователя), то уменьшается ток в якоре двигателя постоянного тока. Соответственно уменьшаются ток в роторе и вращающийся момент асинхронного двигателя. Привод начнет замедляться. При этом будут возрастать скольжение, индуцируемая э.д.с., ток ротора и момент. Вращающийся момент будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет прежнего значения. Равновесие вращающего и статического моментов будет достигнуто, но уже при другой скорости $W_2 < W_1$. Из приведенного описания процесса регулирования видно, что э.д.с. двигателя постоянного тока выполняет роль добавочной э.д.с., вводимой в ротор.

В тех случаях, когда желательно применить электрический каскад, состав которого такой же, как у электромеханического каскада, двигатель постоянного тока размещают отдельно и соединяют его механически с дополнительной машиной пе-

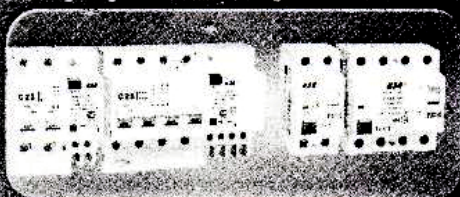
Автоматичні вимикачі на DIN-рейку



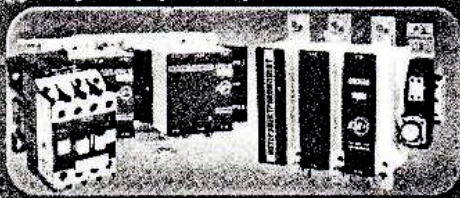
Силові автоматичні вимикачі Серії BA 88 (125-1600 A)



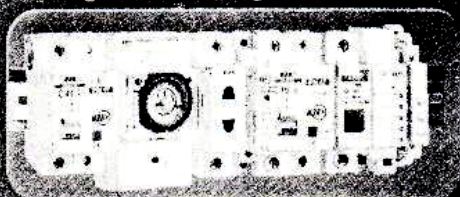
Диференційні автомати, диференційні реле



Контактори, теплові реле, приставки, ручні пускачі, проміжні реле



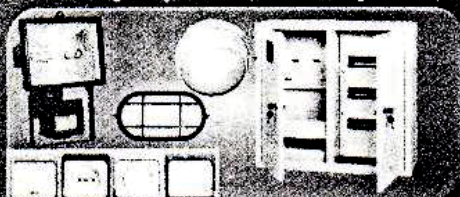
Додаткові пристрої модульної серії



Кабель-канал «ЕЛЕКОР»



Електротехнічні вироби



ГП «Електрокомплект»

тел. (044) 463 82-62 (64), (65)

факс (044) 463 82-62 (64), (65)

e-mail: info@iek.com.ua

www.iek.com.ua

ременного тока, которая работает в режиме генератора и передает энергию скольжения в сеть. Регулирование скорости асинхронного двигателя в электрическом каскаде происходит так же, как в электромеханическом каскаде.

Диапазон регулирования в каскадных установках с машиной постоянного тока не превышает соотношения 2:1. При более глубоком регулировании значительно возрастет суммарная мощность установки. Поэтому к середине XX века сложные и дорогостоящие каскадные регулируемые установки, которые ограниченно применялись в прокатном производстве, утратили свое значение.

80 лет назад, в 1925 г. будущий советский академик М.П. Костенко опубликовал статью, в которой были изложены основы теории асинхронного двигателя при переменной частоте и в которой впервые изменение частоты рассматривалось как метод регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей [5]. Костенко математически вывел следующее общее положение: для обеспечения требуемых значений пускового момента и коэффициентов устойчивости, мощности и полезного действия необходимо одновременно с регулированием частоты определенным образом изменять и напряжения, подводимые к зажимам питания электродвигателя. Общие закономерности регулирования скорости асинхронного двигателя изменением частоты источника питания были исследованы М.П. 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 (привод гребных винтов)). Эта работа считается положившей начало трудной истории частотного управления асинхронными электроприводами. Все последующие работы лишь уточняли отдельные положения статьи М.П. Костенко.

Способ регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью одновременного изменения частоты и напряжения на его зажимах является наиболее экономичным и правильным, но он возможен только при питании двигателя не от общей сети, частота которой не может меняться, а от специального генератора, который может давать ток переменного числа периодов.

Применение обычного синхронного генератора затрудняется тем, что число периодов в этом случае можно плавно изменять только изменением числа оборотов генератора, благодаря чему все преимущества в двигателе будут уничтожены

неблагоприятными условиями работы генератора. В 1916 г. Н.С. Япольский – выпускник Петербургского технологического института в сотрудничестве с М.П. Костенко (тогда еще студентом Петербургского политехнического института) начали разрабатывать для питания асинхронных двигателей специальный генератор с раздельно управляемыми напряжением и частотой при постоянной его скорости. Такой компенсированный коллекторный многофазный альтернатор с круговым вращающимся полем и независимым возбуждением переменного тока был ими построен и испытан [6]. В этом генераторе вторичная э.д.с. при возбуждении с ротора пропорциональна только числу оборотов и магнитному потоку и не зависит от числа периодов; но число периодов главной цепи в этом случае зависит не только от числа периодов возбуждения, но и от числа оборотов коллекторного альтернатора. Многофазная коллекторная машина постоянного числа оборотов может быть построена на значительно большую мощность и напряжение, чем коллекторный двигатель, работающий на переменной скорости. Первый патент на эту машину был заявлен Н.С. Япольским и М.П. Костенко в 1921 г. Независимо от них Козичек в Германии в 1921 г. создал свой первый действующий коллекторный генератор с питанием через ротор, но первые сведения о его работе появились в печати лишь в 1924 г.

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

Впереди был долгий и трудный путь развития.

Литература:

1. Веселовский О.Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский. – М., Л.: ГЭИ, 1958.
2. Харитонов А.М. Многоскоростные двигатели в промышленных электроприводах. – М.: «ЭНЕРГИЯ», 1971.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2. Машины переменного тока. – М – Л.: ГЭИ, 1958.
4. Полтава Л.И. Основы электропривода. – М.: «НЕДРА», 1970.
5. Костенко М.П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов. – «Электричество», 1925, № 2.
6. Костенко М.П. Компенсированный коллекторный многофазный альтернатор с круговым вращающимся полем и независимым возбуждением переменного тока. – «Электричество», 1925, № 7.