

Электрические машины с поступательным движением

Ю.В. Черников

(Окончание. Начало см. ЭП, № 5, 2010 г.)

Работы по созданию линейных асинхронных машин в РСФСР были начаты в 1919 г. инженером Я.С. Япольским. В 1920 г. в «Работах научно-технических учреждений Республики за 1919 г.» в статье «Магнитофугальное бюро» были сообщены сведения о «магнитофугальных» ударных машинах инженера Япольского, который предложил назвать всякое движущееся магнитное поле, образуемое многофазным током, независимо от формы самого поля и формы траектории, по которой оно движется, магнитофугальным полем (от латинского «fugo» – бегу), приборы, образующие это поле, магнитофугами, а всякую систему проводников, приводимую в движение этим полем, магнитофугальным бегуном. Затем он выступил с докладом на эту же тему на

VIII Всероссийском электротехническом съезде, получил совместно с академиком М.П. Костенко зарубежные патенты. Япольский теоретически доказал, что для получения наивыгоднейшего режима работы линейного асинхронного двигателя (постоянства скольжения) в приводе возвратно-поступательного движения его необходимо питать от источника тока переменной частоты и напряжения [1]. В этом случае значительно снижаются пусковые потери и ускоряется протекание переходного процесса. Построенный им коковный молот (рис. 1) был простого действия, т. е. электромагнитной силой его подвижная часть (бегун) только поднималась, а падала она под действием силы тяжести. Экспериментальные исследования этого молота на 400 кг с использованием коллекторного генератора переменной частоты системы Костенко-Япольского показали, что его к.п.д. гораздо больше, чем у парового. Япольский так же, как и Тромбетта, сумел заметить отрицательные последствия размыкания магнитной цепи, самым очевидным из которых было нарушение (до 20°) симметрии токов фаз. Суть краевых эффектов тогда еще понять не удалось. Тогда же «магнитофугальными» машинами занимался инженер С.А. Пресс.

В 1936 – 1937 гг. во Всесоюзном электротехническом институте по инициативе А.Г. Иосифьяна инженером Б.Д. Садовским были проведены исследования линейного асинхронного двигателя. Здесь был разработан и изготовлен молот для вбивания деревянных свай с двусторонним линейным асинхронным двигателем [2]. Для увеличения магнитной проводимости вторичная часть была выполнена в виде медной решетки с железными вставками (аналог беличьей клетки). Средняя скорость движения вторичного элемента составляла от 3 до 5 м/с, энергия удара – 140 кгм, частота – 100 ударов/мин, а к.п.д. электромола – от 30 до 35 %. Электромолот питался от специального агрегата, состоящего из генератора Шербиуса, возбудителя и поста управления. Этот агрегат обеспе-

чивал необходимый закон изменения во времени амплитуд питающих напряжений и их частоты. Однако к.п.д. всей установки в целом оказался довольно низким (от 12 до 16 %), а система регулирования напряжения и частоты – громоздкой.

Важным результатом этих исследований явилось то, что Садовский впервые показал, что в плоскостном двустороннем линейном асинхронном двигателе имеется неравномерность распределения амплитуды магнитной индукции в зазоре этого двигателя при равномерно распределенной обмотке и симметричной системе токов, приводящая к уменьшению тягового усилия двигателя. Для создания равномерно бегущего поля и, соответственно, наибольшего тягового усилия в двигателе необходимо устранить возможность шунтирования его магнитного поля и иметь относительно малый воздушный зазор [3].

В 1937 – 1938 гг. на Харьковском электромеханическом заводе инженером Г.И. Штурманом были впервые разработаны и изготовлены несколько опытных образцов цилиндрических или трубчатых линейных асинхронных двигателей (рис. 2), т. е. таких двигателей, магнитное поле в которых движется внутри трубчатого индуктора вдоль его оси [4]. Идея создания такого трубчатого двигателя заключается в размыкании нормального статора, выпрямлении его в плоскость и последующем сворачивании в полый цилиндр, вдоль внутренней образующей которого располагается активная зона машины. Такую структуру можно назвать «электромагнитной пушкой». Одно из достоинств этого цилиндрического двигателя состоит в том, что его обмотки представляют собой последовательность кольцевых секций, что резко упрощает изготовление обмоток. Двигатели показали хорошую работоспособность, имели низкую стоимость и дали материал для новых теоретических и практических исследований. К этому же времени профессор А.И. Москвитин в качестве одного из вариантов цилиндрического вторичного элемента трубчатых двигателей предло-

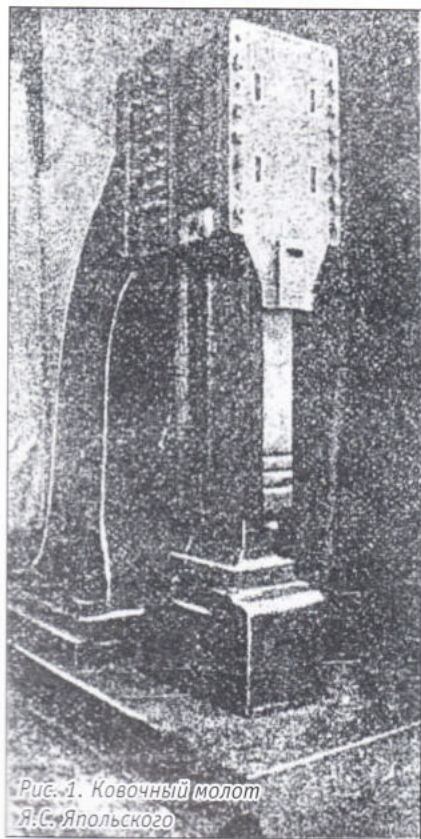


Рис. 1. Ковочный молот Я.С. Япольского



жил применять стальной шток, на который надеты и запрессованы попеременно медные и стальные кольца.

В 1930 г. ленинградский инженер (впоследствии профессор) П.А. Фридкин изобрел так называемый безредукторный дугостаторный привод [5]. Статор таких машин занимает лишь часть длины окружности, а в качестве ротора используется барабан исполнительской машины или маховик. Фридкин убедительно показал, что эффективность нового вида привода следует определять не по к.п.д. отдельно взятого двигателя, а с учетом комплекса «двигатель – передаточный механизм». Автор упорно совершенствовал свою систему привода и добился ее внедрения в промышленности. Впоследствии дугостаторные приводы нашли применение в низкоскоростных барабанных мельницах для размалывания угля, цементного клинкера и т.п., в крупных компрессорах, шахтных подъемниках и других машинах. Теория машин с дуговым статором разрабатывалась П.А. Фридкиным, М.Г. Резиным и другими учеными.

Основоположником теории электродвигателей с разомкнутым магнитопроводом можно заслуженно считать профессора Харьковского политехнического института Григория Исаевича Штурмана. В 1946 г. он опубликовал в журнале «Электричество» работу [6], получившую со временем всеобщее признание в СССР и за рубежом. Штурман дал физическое толкование пульсациям амплитуды магнитной индукции в зазоре индуктора, установил, что кроме бегущего поля постоянной амплитуды имеются две пульсирующие составляющие, одна из которых изменяется вдоль индуктора по закону гиперболического косинуса (и по своему воздействию более значительна), другая – по закону гиперболического синуса. Первое из дополнительно пульсирующих полей обусловлено явлениями шунтирования междужелезного пространства машины, второе определяется величиной относительной проницаемости ядра магнитной системы. В следующей статье, написанной Штурманом совместно с профессором Р.Л. Ароновым и опубликованной в 1947 г. в журнале «Электричество» [7], был рассмотрен нагрузочный режим индукционной машины с разомкнутым магнитопроводом.

В конце сороковых годов прошлого столетия в области линейных двигателей начал работать профессор Манчестерского университета (Англия) Е. Лейтуэйт. Вначале Лейтуэйт недооценил трудности теории линейных двигателей. В 70-х годах на Лондонской меж-

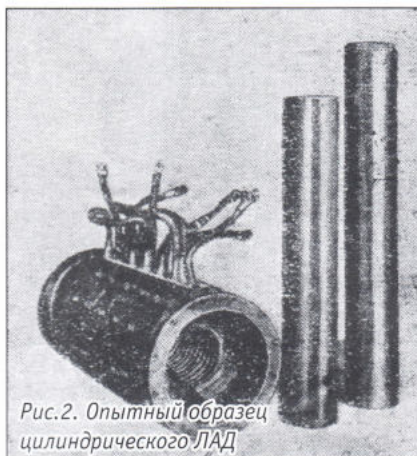


Рис. 2. Опытный образец цилиндрического ЛАД

дународной конференции по линейным двигателям он признался, что если бы в 50-х годах он познакомился с работами Штурмана и Аронова, то отказался бы от своего исследования. Но в 50-х и 60-х годах Лейтуэйт развил активную научную деятельность и привлек внимание мировой электротехнической общественности к данной проблеме. На Западе Лейтуэйта считают «отцом» линейных двигателей.

В 1946 г. фирма «Вестингауз Электрик» изготовила два очень крупных линейных электродвигателя для военно-морского флота США с целью использования их в системе ускоренного взлета самолетов [8]. Эти системы называют электропультами. Движущийся статор двигателя был смонтирован на тележке, которая через колеса опирается на рельсы (рис. 3). На тележке также располагалось трехфазное контактное устройство. Неподвижный вторичный элемент имел длину в несколько сотен метров и состоял из обмотки типа беличьей клетки, изготовленной из медного сплава и вставленной в набранный из пластин стальной сердечник. Подача питания на статор осуществлялась с помощью щеток, перемещающихся по канавкам вдоль вторичного элемента. Были сооружены две экспериментальные установки в натуральную величину: одна – длиной 1 км, другая – свыше 1,5 км. Двигатель создавал силу тяги 77110 Н при любой скорости (от 0 до 354 км/ч), при этом его мощность составляла 10000 л.с. Реактивный самолет массой 4,5 т на полосе длиной 165 м удавалось разогнать за 4,2 с до скорости 187 км/ч. Энергия подавалась от генератора с маховиком, номинальная мощность которого на протяжении 15 с достигала 12000 кВт. Запуск проходил при постоянной частоте тока, равной 220 Гц, и сопровождался большими потерями скольжения. Впоследствии от этой системы отказались по причине высоких капиталовложений, связанных с ее созданием. Однако запуск самолета

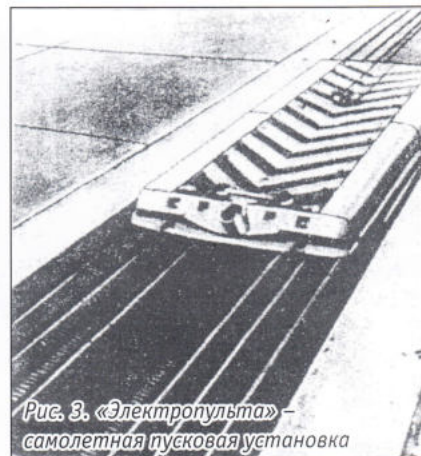


Рис. 3. «Электропульт» – самолетная пусковая установка

тов с помощью электропульты показал, что линейным асинхронным двигателем можно осуществлять тягу экипажей на больших скоростях. С инженерной точки зрения электропульт является специальным двигателем. Поскольку он использовался только для ускорения, его режим работы был кратковременным (около 15 с), к.п.д. и коэффициент мощности имели второстепенное значение, а влияние их могло быть учтено введением большого запаса по мощности.

В 50 – 60-е годы работы по применению линейных асинхронных двигателей в железнодорожном транспорте проводились в Советском Союзе, Франции, Японии, Англии, США, ФРГ и ГДР. Во всех упомянутых странах были изготовлены и испытаны опытные участки железных дорог, оборудованные вагонами с линейными двигателями, проектировались поезда с различными типами подвески и пути. В Украине тогда этими задачами совместно занимались Киевский завод электротранспорта им. Ф.Э. Дзержинского и Киевский политехнический институт. Позднее на базе того же завода было образовано ОКБ линейных двигателей [9]. На рис. 4 показан опытный образец тягового двустороннего асинхронного двигателя ЛАД-600 этого ОКБ, рассчитанный на напряжение 1500 В, частоту 100 Гц, потребляемый ток 513 А, развивал скорость 44 м/с (160 км/ч) при силе тяги 13500 Н; его к.п.д. составлял 79 %, $\cos \varphi = 0,57$ при немагнитном зазоре 30 мм.

В конце 40-х годов прошлого столетия начинает проявляться интерес к электромагнитным жидкометаллическим насосам. Первые коммерческие насосы для перекачивания расплавленного алюминия были изготовлены в 1947 г. фирмой Ajax Engineering [10].

Интерес к электромагнитным насосам еще более увеличился в связи с развитием ядерной техники. Электромагнитные насосы оказались удобным средством для

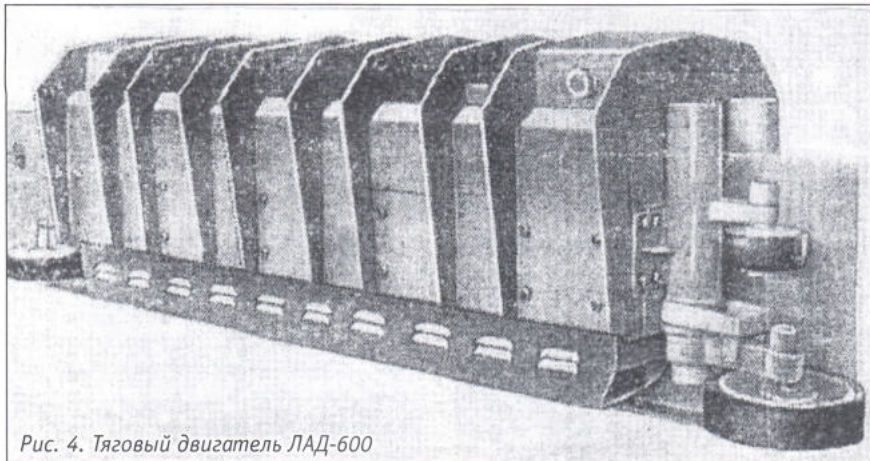


Рис. 4. Тяговый двигатель ЛАД-600

нагнетания жидких металлов (в частности, натриево-калиевых смесей высокой проводимости), которые используются для охлаждения ядерных реакторов, поскольку они (эти насосы) обладают свойством полной герметичности и не имеют сальников. Такие насосы были созданы с использованием линейных асинхронных двигателей в плоском двустороннем и трубчатом вариантах. Еще ранее П.Е. Тряпицын предложил конструкцию насоса и в 1927 г. получил авторское свидетельство СССР № 6574 на изобретение «Электрический насос для подъема металлов, находящихся в жидком состоянии, и электролитов». Это был индукционный цилиндрический насос с бегущим магнитным полем. Примерно в это же время аналогичная конструкция была запатентована А. Эйнштейном и Л. Сциллардом [11]. Предпочтение, как правило, отдавалось плоским машинам ввиду того, что в случае перегорания первичной обмотки в трубчатой машине приходится разбирать трубопровод, по которому циркулирует охлаждающая жидкометаллическая смесь.

Еще одним важным типом электромагнитного насоса является винтовой индукционный насос. Схема индукционного насоса с винтовым каналом была предложена в 1915 г. Л. Чаббом. Такая машина [12] получается из нормального асинхронного двигателя следующим образом: ротор двигателя закрепляется в неподвижном положении, его зубцовый слой вместе со вторичной обмоткой срезаются и взамен его на цилиндрическую поверхность неподвижного «ротора» наматывается спиралевидный или винтовой канал с жидким металлом. При включении обмотки статора в трехфазную сеть возникает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в жидком металле вторичные токи. В результате машина работает в двигательном (насосном) режиме.

Фирма General Electric Co (США) в 1948 – 1950 гг. выпустила и испытала некоторые плоские и винтовые индукционные насосы [13]. С 1953 по 1956 г. была изготовлена и испытана серия плоских индукционных насосов большой мощности для ядерных реакторов. Насосы этого типа, установленные на подводной лодке «Sea wolf» («Морской волк»), обеспечили расход жидкого натрия 0,208 м³/с, при этом развиваемая насосами полезная мощность составляла 125 кВт. Коэффициент полезного действия насосов – 43 %. Изготовленные этой же фирмой индукционные насосы с винтовым каналом обеспечивали перекачивание калия при температуре до +1200 °С. Винтовые машины оказались наиболее пригодны для работы при малых расходах жидкого металла (до нескольких десятков м³/ч) и относительно высоких напорах (до 20 – 30 кг/см²).

Большую активность в разработке электромагнитных насосов также проявили фирмы Atomics International и Mine Safety Appliances Research Co.

В Англии большой объем работ в данном направлении был выполнен фирмами English Electric Co, British Thomson – Houston Co. Электромагнитные насосы были установлены на реакторе в Даунрее.

В Советском Союзе основополагающие работы в этой области, относящиеся к вопросам теории, конструирования и применения электромагнитных насосов были выполнены в Таллинском, Ленинградском и Донецком политехнических институтах, Институте физики АН Латвийской ССР, Институте проблем литья АН УССР и других организациях. Значительная часть этих исследований была направлена на применение магнитогидродинамических насосов в металлургической промышленности.

В 60-е годы прошлого столетия состояние теории и практики линейных асинхронных двигателей достигло такого

уровня, что стало возможным их широкое применение во всем мире в различных областях промышленности (в приводах конвейеров, поворотных столов, стрелочных переводов, транспортных узлов робототехнических комплексов, ткацких станков, в рудничном транспорте, в раздвижных дверях, в системах транспортировки труб и рельсов, в стендах для разрушающих испытаний автомобилей и т.п. [14]); в железнодорожном транспорте; в системах электромагнитного транспортирования жидкого металла в металлургии [15] и в ядерной технике.

Литература:

1. Япольский Я.С. Магнитофугальные ударные машины // «Электричество», 1925, № 11, с. 646 – 653.
2. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 18 – 19.
3. Садовский Б.Д. Асинхронный двигатель как машина поступательно-возвратного движения // Вестник электропромышленности, 1940, № 8, с. 10 – 15.
4. Там же, где и 2, с. 19.
5. Фридкин П.А. Безредукторный дугостаторный электропривод. – «Энергия», 1970.
6. Штурман Г.И. Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом // «Электричество», 1946, № 10, с. 43 – 50.
7. Штурман Г.И., Аронов Р.А. «Краевой» эффект в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом // «Электричество», 1947, № 2, с. 54 – 59.
8. Лейтуэйт Е.Р., Насар С.А. Электрические машины с поступательным движением // ТИИЭР, 1970, Т. 58, № 4, с. 18 – 30.
9. Там же, где и 2, с. 22 – 23.
10. Tama M. Electromagnetic Pumping of Molten Metals. – Iron Age, December 4, 1947.
11. Лиелпетер Я.Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины. – Рига: «Зинатне», 1969, с. 9.
12. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: «Энергия», 1970, с. 22.
13. Там же, где и 11, с. 10.
14. Соколов М.М., Сорокин Л.К. Электропривод с линейными асинхронными двигателями. – М.: «Энергия», 1974, с. 16 – 30.
15. Верте Л.А. Электромагнитный транспорт жидкого металла. – М.: «Металлургия», 1965.