

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в силовых ударных и быстродействующих приводах технологических или исполнительных механизмов.

Известен линейный электродвигатель, содержащий коаксиально расположенные, подключаемую к источнику электроэнергии первичную обмотку и ферромагнитный сердечник, втягиваемый во внутрь обмотки при появлении в ней тока [1].

Недостатками этого электродвигателя являются относительно невысокие скорости и удельные силы, обусловленные физической природой ферромагнетиков. Причем в начальный момент движения сила притяжения мала из-за большого воздушного зазора, и только в дальнейшем, по мере перемещения сердечника и роста тока, сила тяги увеличивается.

Известен линейный коаксиальный асинхронный электродвигатель, содержащий подвижный ферромагнитный сердечник, на наружной поверхности которого коаксиально размещены чередующиеся медные и стальные кольца, и внешний ферромагнитный корпус, в пазах которого уложена обмотка переменного тока [2]. Токи в различных пазах статорной обмотки в каждый момент времени различны и отличаются на определенный фазовый сдвиг. За счет этого образуется бегущая волна магнитного поля, индуцирующая в медных кольцах токи, взаимодействие которых с бегущей волной и создает тяговое усилие двигателя. Скорость бегущей волны магнитного поля статора ограничена частотой источника электроэнергии и необходимостью плавного повышения частоты по мере ускорения подвижного сердечника. Следствием этого являются: потребность в регулируемом преобразователе частоты, необходимость значительных линейных перемещений сердечника относительно статора, большие потери мощности и нагрев двигателя при значительных величинах скольжений, что имеет место особенно при быстром разгоне сердечника.

Наиболее близким по технической сущности предлагаемому изобретению является линейный индукционный электродвигатель ударного действия, содержащий цилиндрические коаксиально расположенные взаимосвязанную с упором первичную обмотку, подключаемую к источнику электроэнергии и расположенную в ферромагнитном корпусе, и индуктивно связанный с обмоткой вторичный короткозамкнутый токопроводящий элемент, представляющий собой пакет медных колец, закрепленных на подвижном ферромагнитном сердечнике, взаимосвязанном с бойком электродвигателя [3].

При подключении первичной обмотки к источнику электроэнергии в обмотке нарастает ток, магнитное поле которого индуцирует в короткозамкнутом токопроводящем элементе ток. Взаимодействие наведенного тока с магнитным полем первичной обмотки приводит к возникновению отталкивающих электродинамических усилий, под действием которых и происходит быстрое перемещение сердечника с бойком. Поскольку токи во всех проводниках первичной обмотки в каждый момент времени одинаковы, то для данного электродвигателя можно использовать простой нерегулируемый источник электроэнергии, например однофазную сеть промышленной частоты. Достоинством известного электродвигателя является возможность возбудить кратковременно сильный ток в первичной обмотке, а через индуктивную связь, - и большой ток во вторичном короткозамкнутом токопроводящем элементе. Это и обуславливает значительную ударную отталкивающую силу сердечника с бойком относительно обмотки с упором.

Однако в устройстве-прототипе существует относительно малый диапазон взаимного аксиального положения токопроводящего элемента относительно обмотки, при котором между ними возникает эффективное силовое взаимодействие. При перемещении же сердечника с бойком относительно корпуса магнитная связь между первичной обмоткой и вторичным токопроводящим элементом снижается, что приводит к уменьшению величины наведенного тока и, соответственно электродинамической силы отталкивания.

Поскольку обмотка и вторичный элемент выполнены сосредоточенными, а не в виде рассредоточенных секций, то и сила отталкивания также сконцентрирована в пространстве между ними, что обуславливает особенно опасные механические напряжения в обмотке, вызывая, например разрушение межвитковой и корпусной изоляции. При увеличении же объема указанных активных элементов двигателя, магнитная связь между ними будет снижаться, а скин-эффект сделает увеличение объема вторичного элемента вообще нецелесообразным. Повышение же токовой нагрузки в первичной обмотке приведет к насыщению ферромагнитных корпуса и сердечника, что сделает такое повышение неэффективным.

В известном двигателе при изменении скорости нарастания тока в первичной обмотке, например при изменении источника электроэнергии, сильно изменяется величина и характер тока во вторичном элементе, что существенно влияет на коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя. Так при наличии тока в первичной обмотке, в то время когда сердечник уже значительно переместился и магнитная связь ухудшилась, данный ток обуславливает лишь потери мощности в двигателе, не вызывая полезного силового воздействия.

Задачей изобретения является увеличение силы удара бойка относительно упора, и, как результат, погашение эффективности преобразования электромеханической энергии и КПД электродвигателя.

Поставленная цель достигается тем, что в линейном электродвигателе ударного действия, содержащем цилиндрические коаксиально расположенные взаимосвязанную с упором первичную обмотку, подключаемую к источнику электроэнергии, и индуктивно связанный с обмоткой вторичный короткозамкнутый токопроводящий элемент, центральная плоскость которого смещена относительно центральной плоскости обмотки в сторону движения взаимосвязанного с указанным элементом бойка, а также - наружный ферромагнитный корпус и внутренний ферромагнитный сердечник, - обмотка выполнена в виде радиальных и обращенной к бойку торцевой секций, расположенных в наружных пазах сердечника, а вторичный токопроводящий элемент выполнен в виде зафиксированных внутри корпуса радиальных и торцевой секций, между которыми размещены ферромагнитные кольца, так, что относительно центральной плоскости секции обмотки центральная плоскость смежной секции токопроводящего элемента смещена в сторону движения бойка, а центральная плоскость смежного ферромагнитного кольца смещена в сторону упора, причем торцевая секция токопроводящего элемента выполнена в виде диска с цилиндрической наружной обечайкой, охватывающих, соответственно, боковую и часть наружной сторон торцевой секции обмотки.

Кроме того, цилиндрическая наружная обечайка охватывает половину наружной стороны торцевой секции обмотки.

Одна из боковых сторон радиальной секции токопроводящего элемента и ферромагнитного кольца размещена напротив смежной секции обмотки, а их другая боковая сторона размещена напротив зубца сердечника.

Боковые стороны радиальных секций токопроводящих элементов и ферромагнитных колец находятся в контакте между собой смежно центральной плоскости радиальной секции обмотки и центральной плоскости зубца сердечника.

Между секцией токопроводящего элемента и ферромагнитным кольцом внутри корпуса размещено немагнитное изоляционное кольцо.

Наружный ферромагнитный корпус выполнен заодно с бойком. Радиальные секции обмотки выполнены сечением, вытянутым вдоль аксиальной оси, а торцевая секция обмотки выполнена сечением, вытянутым в радиальном направлении и выполнена в виде дисковой катушки из ленточного провода.

Последовательно соединенные смежные секции обмотки намотаны встречно и количество последовательно соединенных секций обмотки кратно двум.

У параллельно соединенных смежных секций обмотки со встречной намоткой витков первый виток каждой секции соединен с одной шиной источника электроэнергии, а последний виток каждой секции соединен с другой шиной источника. А у параллельно соединенных смежных секций обмотки с согласной намоткой витков первый и последний витки соединены с различными из двух шин источника электроэнергии.

Внутри сердечника имеется центральное отверстие, в котором расположены шины источника электроэнергии.

В центре обращенной к бойку торцевой стороны сердечника выполнен направляющий штырь, конец которого охвачен подшипником скольжения, запрессованным внутри бойка.

Вовнутрь к обращенному к упору концу ферромагнитного корпуса наружной стороной прикручен направляющий ферромагнитный элемент с внутренней полостью, причем один конец направляющего элемента прижат к боковой стороне крайней радиальной секции токопроводящего элемента, а вовнутрь другого конца впрыснут подшипник скольжения, охватывающий направляющую часть ферромагнитного сердечника.

Внутренние диаметры обечайки торцевой и радиальных секций токопроводящего элемента, ферромагнитных и немагнитных изоляционных колец, а также внутренней полости направляющего ферромагнитного элемента равны.

Секции токопроводящего элемента, ферромагнитные и немагнитные изоляционные кольца запрессованы внутри ферромагнитного корпуса, а секции первичной обмотки и центральное отверстие ферромагнитного сердечника заполнены терморезистивным компаундом.

В качестве источника электроэнергии используется конденсаторный накопитель энергии.

В предлагаемом коаксиальном линейном электродвигателе за счет секционирования первичной обмотки и вторичного токопроводящего элемента, а также распределения их вдоль оси происходит рассредоточивание электродинамических сил отталкивания между соответствующими смежными секциями обмотки и короткозамкнутого вторичного элемента, не вызывая значительных концентраций сил и механических напряжений внутри ударного двигателя.

Ферромагнитные кольца, размещенные между токопроводящими элементами, при появлении тока в первичной обмотке притягиваются к смежной секции обмотки. Эта сила, за счет смещения центральных плоскостей смежных токопроводящих и ферромагнитных вторичных элементов относительно секции обмотки, имеет такое же направление, как и сила электродинамического отталкивания, увеличивая силу удара бойка. При этом суммарная величина силы удара даже при рабочем перемещении бойка практически сохраняется, поскольку при указанном перемещении величина электродинамической силы отталкивания уменьшается, а величина электромагнитной силы притяжения увеличивается.

Для более эффективного отталкивания на конце сердечника расположены специальные торцевые секции обмотки и вторичного токопроводящего элемента, причем последняя охватывает первую по боковой и части наружной сторон. За счет повышенной магнитной связи между указанными секциями, сохраняемой даже при перемещении бойка из-за наружной обечайки, во вторичной секции наводится большой ток от торцевой секции обмотки и на диск секции действует значительная аксиальная сила ударного типа. Наличие обечайки увеличивают силу отталкивания, однако, как показывают исследования наибольшая величина силы будет тогда, когда обечайка охватывает половину наружной стороны торцевой секции обмотки. Это объясняется тем, что если ширина обечайки будет меньше, то магнитная связь между торцевыми секциями обмотки и токопроводящего элемента ухудшается и быстрее падает при рабочем перемещении бойка, а если ширина обечайки будет больше, то появляется составляющая электродинамической силы, действующая в противоположном аксиальном направлении, что снижает силу удара бойка.

Электрическое соединение смежных секций обмотки согласовано с их направлением намотки так, чтобы при подключению к источнику электроэнергии токи в них были направлены в противоположные стороны. За счет этого весь магнитный поток между секциями обмотки проходит в радиальном направлении, что вызывает наибольшее притяжение ферромагнитных колец и отталкивание токопроводящих радиальных секций, смежных к соответствующей секции обмотки в аксиальном направлении в сторону бойка. Для того, чтобы аксиальная сила была наибольшей, боковые стороны радиальных секций расположены смежно центральной плоскости обмотки и зубца сердечника. Ширина этих секций в основном и определяет рабочий ход линейного двигателя. Увеличить шаг и сохранить высокую эффективность работы можно за счет размещения между ферромагнитными кольцами и токопроводящими секциями внутри корпуса немагнитных изоляционных, например пластмассовых, колец.

Наиболее сильное электромеханическое взаимодействие между радиальными секциями обмотки и их смежными токо- и ферромагнитными секциями происходит, если эти секции выполнены соленоидальной

формы, т.е. имеют сечение, вытянутое вдоль аксиальной оси двигателя. Торцевая же секция обмотки наиболее эффективна в форме плоского диска, т.е. имеет сечение, вытянутое в радиальном направлении. В крайнем пазу одна стенка отсутствует, что повышает силовое взаимодействие торцевых секций обмотки и вторичного токопроводящего контура.

В предлагаемом двигателе радиальные токопроводящие секции обеспечивают радиальное электродинамическое центрирование секций обмотки, а значит и сердечника относительно корпуса. Для повышения надежности корпус и сердечник механически центрируются также при помощи расположенных по краям двух подшипников скольжения. Все это позволяет выполнить радиальный воздушный зазор между неподвижным сердечником и подвижным корпусом с ферро- и токопроводящими секциями минимально возможным по технологическим соображениям (доли мм), что также способствует увеличению силы удара.

Наличие центрального отверстия внутри сердечника позволяет вывести через него шины источника электроэнергии, сформировать магнитную цепь внутри сердечника и использовать как технологическое отверстие для пропитки секций обмотки с сердечником термореактивным компаундом на основе, например эпоксидной смолы, при вертикальном расположении двигателя бойком вниз. В радиальном зазоре между сердечником и корпусом во время пропитки прокладывается невзаимодействующая с компаундом, например фторопластовая пленка микронной толщины,

В предлагаемом двигателе корпус выполняется в виде бойка, т.е. отсутствуют промежуточные передаточные элементы, что повышает эффективность преобразования энергии и КПД двигателя. При этом подшипники скольжения надежно защищают от внешней среды обмотку и другие активные элементы электродвигателя, что важно при работе его в агрессивной среде, под водой или землей.

Известна конструкция линейного индукционного электродвигателя ударного действия, содержащего ряд коаксиально установленных и распределенных вдоль оси последовательно возбуждаемых одинаковых секций первичной обмотки, вдоль которых перемещается вторичный короткозамкнутый токопроводящий элемент [4]. В данном двигателе в каждый момент времени возбуждается ток только одна секция обмотки, взаимодействующая со вторичным элементом, а остальные секции при этом не работают. Выбор момента и продолжительность возбуждения каждой секции обмотки очень ограничен, критичен и представляет сложную техническую задачу. В предлагаемом же электродвигателе все секции обмотки возбуждаются синхронно от одного источника и подобной проблемы не существует.

На фиг.1 представлена конструктивная схема линейного электродвигателя ударного действия; на фиг.2 - конструктивная схема электродвигателя с немагнитными изоляционными кольцами (показаны направления токов в секциях первичной обмотки и вторичного токопроводящего элемента).

Линейный электродвигатель ударного действия цилиндрического типа состоит из коаксиально расположенных первичной обмотки, подключаемой к источнику электроэнергии (не показан) и выполненной в виде трех радиальных 1, 2, 3 и одной торцевой 4 секций, а также индуктивно связанного с обмоткой вторичного короткозамкнутого токопроводящего, например медного, элемента, выполненного в виде трех радиальных 5, 6, 7 и торцевой 8 секций. Секции 5, 6, 7 вторичного элемента представляют собой кольца с сечением, вытянутым вдоль оси 9, а секция 8 этого элемента представляет собой диск 10 с цилиндрической наружной обечайкой 11, охватывающих соответственно боковую и часть, например половину, наружной стороны торцевой секции 4 обмотки. Секции обмотки расположены в наружных пазах внутреннего ферромагнитного сердечника 12, а секции вторичного токопроводящего элемента зафиксированы, например запрессованы внутри наружного ферромагнитного корпуса 13 электродвигателя. Между токопроводящими секциями 5-8 размещены ферромагнитные кольца 14, 15, 16.

На одном конце линейного двигателя находится взаимосвязанный с первичной обмоткой массивный упор 17, а на другом конце - боек 18, взаимосвязанный со вторичным токопроводящим элементом. Порядок расположения короткозамкнутых токопроводящих секций и ферромагнитных колец в корпусе двигателя такой, что относительно центральной плоскости каждой секции обмотки, например 2, центральная плоскость смежной секции токопроводящего элемента 6 смещена в сторону движения бойка 18, а центральная плоскость смежного ферромагнитного кольца 14 смещена в сторону упора 17. Ширина запрессованных в корпус 13 элементов такова (фиг.1), что одна из боковых сторон радиальной секции токопроводящего элемента, например 6, и ферромагнитного кольца 14 находятся между собой в контакте у центральной плоскости обмотки 2, а их другая боковая сторона размещена смежно центральной плоскости, соответственно зубцов 19 и 20 сердечника 12.

У линейного электродвигателя, изображенного на фиг.2, внутри корпуса 13 между секциями токопроводящих и ферромагнитных элементов размещены немагнитные изоляционные кольца 21.

Наружный корпус 13 выполнен заодно с бойком 18 в виде единого элемента.

Для оптимального распределения магнитного потока первичной обмотки в ферромагнитных элементах: сердечнике, корпусе и кольцах, а также повышения магнитной связи с токопроводящими секциями вторичного элемента (что обеспечивает увеличение силы удара) радиальные секции первичной обмотки 1, 2 и 3 выполнены сечением, вытянутым вдоль аксиальной оси 9, а торцевая секция обмотки 4 для усиленного электродинамического взаимодействия с торцевой секцией 8 токопроводящего элемента выполнена сечением, вытянутым в радиальном направлении.

Поскольку для увеличения силы удара у торцевой секции обмотки 4 боковая стенка паза сердечника, обращенная к бойку 18, отсутствует, то из технологических и конструктивных соображений торцевая секция обмотки 4 выполнена в виде однорядовой многослойной дисковой катушки из ленточного провода. Радиальные секции обмотки, 1, 2 и 3 намотаны из провода либо круглого либо практически квадратного сечения в виде многорядовой многослойной катушки.

Величина тока во всех секциях 1-4 первичной обмотки в каждый момент времени одинакова, а направления токов в смежных секциях встречно (фиг.2), что обеспечивается следующими вариантами технических мероприятий:

- при последовательном соединении смежные секции обмотки намотаны встречно;

- у параллельно соединенных смежных секций обмотки со встречной намоткой первый виток каждой секции соединен с одной шиной 22 источника электроэнергии, а последний виток - с другой шиной 23 источника;

- у параллельно соединенных смежных секций обмотки с согласной намоткой витков первый и последний витки соединены с различными из двух шин 22 и 23 источника электроэнергии.

Шины 22 и 23 в электродвигателе расположены в центральном отверстии 24, выполненном внутри сердечника 12. Для того, чтобы шины источника соединялись с первыми витками крайних секций обмотки 1 и 4, что упрощает конструктивные и технологические проблемы по токоподводу, количество секций обмотки при последовательном их соединении должно быть кратно двум.

В центре торцевой стороны сердечника 12, обращенной к бойку 18, выполнен направляющий штырь 25, являющийся продолжением открытого паза торцевой секции 4 обмотки. Конец штыря 25 охвачен подшипником скольжения 26, запрессованным внутри бойка 18. На конце ферромагнитного корпуса 13, обращенном к упору 17, вовнутрь, наружной стороной прикручен направляющий ферромагнитный элемент 27, имеющий внутреннюю полость 28, в которой расположен предохранительный демпферный элемент 29 (фиг.2). Один конец направляющего элемента 27 прижат к боковой стороне радиальной секции 5 токопроводящего элемента, а вовнутрь другого конца впрессован подшипник скольжения 30, охватывающий направляющую часть 31 ферромагнитного сердечника (фиг.1).

Внутренние диаметры обечайки 11 торцевой 8 и радиальных секций 5-7 токопроводящего элемента, ферромагнитных 14-16 и немагнитных изоляционных 21 колец, а также внутренней полости 28 направляющего элемента 27 равны одному диаметру  $D$  (фиг.2). Секции 5-8 токопроводящего элемента, ферромагнитные 14-16 и немагнитные изоляционные 21 кольца запрессованы внутри ферромагнитного корпуса 13, например при помощи направляющего элемента 27 путем вкручивания его в корпус. Секции первичной обмотки 1-4 и центральное отверстие 24 сердечника 12 заполнены терморезистивным компаундом на основе, например, эпоксидной смолы (на фиг. не показан).

У двигателя, изображенного на фиг.1, секции обмотки соединены последовательно. Штриховыми линиями показаны токовые переключатели 32, соединяющие первый и последний витки секций с шинами 22 и 23 источника и между собой. На наружные боковые поверхности направляющего элемента 27 и упора 17 надет гибкий, например резиновый, элемент 33, дополнительно препятствующий попаданию элементов внешней среды, например земли или воды, в середину электродвигателя. К упору 17 прикручена технологическая труба 34, предназначенная, например для подвода шин от источника электроэнергии при работе ударного двигателя в качестве подземного электробура. На фиг.2 направляющий элемент 27 соединен с упором 17 при помощи пружины 35, возвращающей корпус с бойком в исходное состояние после рабочего импульса. В качестве источника электроэнергии используется емкостной накопитель, обеспечивающий мощные и короткие импульсы тока в первичной обмотке, необходимые для создания краткого, но сильного механического удара бойка.

Линейный электродвигатель ударного действия работает следующим образом.

В исходном состоянии боек упирается в нагрузку (на фиг. не показана), например обрабатываемую деталь, пробиваемое или деформируемое изделие горную породу, разгоняемый объект и др. При подключении электродвигателя к источнику электроэнергии - заряженной батарее конденсаторов, через шины 22 и 23 в секциях первичной обмотки 1-4 возникает импульс потока. Из-за наличия индуктивной связи в секциях 5-8 вторичного токопроводящего элемента возникает ток (фиг.2), направление которого по правилу Ленца противоположно току смежной секции обмотки. Поскольку токи одноименного направления притягиваются, а разноименного - отталкиваются, то секции вторичного элемента создают силу, направленную в сторону бойка 18, совершая некоторое перемещение. При этом ферромагнитные кольца 14-16 притягиваются к смежным секциям обмотки: кольцо 14 - к секции обмотки 2, кольцо 15 - к секции 3, а кольцо 16 - к секции 4. К секции обмотки 1 при этом притягивается направляющий ферромагнитный элемент 27, причем как своей боковой, так и внутренней торцевой сторонами, что повышает силу тяги. Притягивающие усилия, действующие на ферромагнитные кольца и элемент 27, направлены в сторону бойка 18, что вызывает также некоторое их перемещение. Ферромагнитные кольца и короткозамкнутые токопроводящие секции запрессованы в корпусе 13, который также является и элементом магнитопровода, увеличивая магнитное поле в зоне ферромагнитных колец и токопроводящих секций вторичного элемента, а значит и соответствующие тяговую электромагнитную и отталкивающую электродинамическую аксиальные силы. Эти импульсные усилия действуют распределено по всей длине корпуса, передавая результирующую силу бойку 18. Это приводит к значительной ударной кратковременной нагрузке на воздействующий объект или среду, вызывая, например их деформацию. Поскольку первичная обмотка взаимосвязана с массивным малоподвижным упором 17 (при необходимости его объем можно наращивать), то весь корпус с бойком совершает перемещение в сторону от упора. При этом ход корпуса с бойком выбирается относительно небольшим и определяется как жесткостью или твердостью воздействуемой среды или массой объекта, так и тем, что при относительно большом перемещении на ферромагнитные кольца и токопроводящие секции действует сила, направленная в противоположную сторону.

Восстановление исходного состояния двигателя после удара происходит либо при опускании сердечника с упором вниз (фиг.1) под действием силы тяжести, что характерно, например для электробура, либо за счет подтягивания корпуса с бойком вверх к упору 17 при помощи возвратной пружины 35. Аксиальное перемещение корпуса с бойком относительно сердечника с упором происходит с малым радиальным зазором, что обеспечивается двумя подшипниками скольжения 26 и 30.

Центральное отверстие 24 используется как для вывода токовых шин 22 и 23, так и для пропитки под вакуумом секций обмотки эпоксидным компаундом. В процессе пропитки в воздушном зазоре укладывается тонкая фторопластовая лента, двигатель устанавливается вертикально, компаунд заливается сверху через центральное отверстие. Проникая через пазы и отверстия, в которых размещены токовые переключатели 32, компаунд заполняет все пространство секций обмотки и центрального отверстия 24 сердечника.

Образовавшаяся монолитная структура сердечника с обмоткой надежно защищена от воздействия внешней среды и обладает высокими прочностными характеристиками. Дополнительную защиту обеспечивают подшипник скольжения 30 и гибкий герметичный элемент 33, что позволяет эффективно использовать предлагаемый электродвигатель в агрессивной среде.

Достоинством данного ударного линейного двигателя является то, что он является непосредственно исполнительным органом-инструментом, не предполагая наличие дополнительных преобразующих узлов и элементов, что также приводит к повышению КПД и надежности устройства в целом.

Предлагаемый линейный электродвигатель ударного действия был рассчитан, изготовлен, экспериментально исследован и показал высокую эффективность работы.

