

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРОСИСТЕМАХ

До настоящего времени в системах вибродиагностики, виброиспытаний, активной виброзащиты и снятия внутренних напряжений в металле в основном применялись вибростенды электродинамического типа. Они характеризуются широким частотным диапазоном, линейностью развиваемой силы от тока и возможностью управления по заданной программе [1], однако, имеют большие габариты, массу и довольно сложны в изготовлении.

В некоторых случаях необходимый частотный диапазон обеспечивается электромагнитными генераторами механических колебаний (ЭГМК), к недостаткам которых следует отнести малый коэффициент силы (отношение создаваемой силы к массе устройства) и большие нелинейные искажения [2].

Повышение ряда динамических параметров и улучшение других характеристик ЭГМК было достигнуто с созданием качественно новых устройств на базе радиально шихтованного магнитопровода [3—7]. Кроме того, для разных управляемых вибровозбудительных систем были созданы ЭГМК с вращающимся вибрационным полем [8—10]. Сочетание свойств данных ЭГМК и создание соответствующих устройств управления позволяет работать в диапазоне частот 5—600 Гц с большой эффективностью [11]. Исследования показали, что в данном диапазоне частот ЭГМК вполне могут заменить устройства электродинамического типа.

Главной отличительной чертой ЭГМК нового поколения является магнитопровод, который представляет собой цилиндр (рис. 1), собранный из сегментов, шихтованных плоскими пластинами электротехнической стали, ширина и количество которых зависят от диаметра магнитопровода и количества сегментов

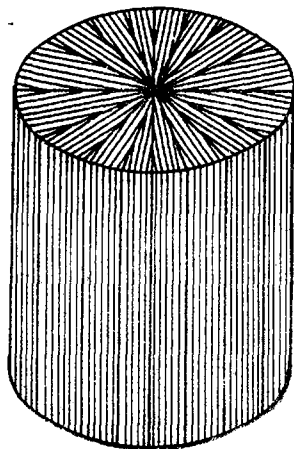


Рис. 1. Конструктивная схема радиально шихтованного магнитопровода

цилиндра. Из собранного магнитопровода путем механической обработки изготавливаются необходимые детали ЭГМК. Кроме того, цилиндрическая форма магнитопровода по сравнению с прямоугольными Ш и П-образной формы дает более удачную компоновку узлов регулирования и подвески устройства.

На основе данного магнитопровода создан ряд новых конструкций, диапазон которых — 5—600 Гц, нелинейные искажения — не более 0,5%, а коэффициент силы достигает 25 Н/кг.

Все ЭГМК двухтактные с подмагничиванием и разработаны на основе базовой модели (рис. 2). Применение дифференциальной схемы включения обмоток и постоянного подмагничивания позволило существенно снизить нелинейные искаже-

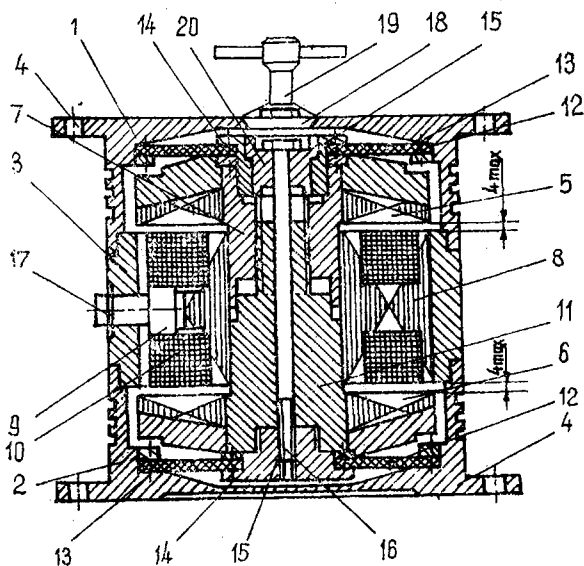


Рис. 2. Двухтактный ЭГМК с радиально шихтованным магнитопроводом: 1 — крышка; 2 — основание; 3 — статор; 4 — опорное кольцо; 5 — магнитопровод верхней половины подвижной части; 6 — магнитопровод нижней половины подвижной части; 7 — резьбовая втулка; 8 — магнитопровод статора; 9 — отверстие выводов; 10 — пазы в статоре; 11 — втулка; 12 — мембраны; 13, 14 — винты; 15 — резьбовая втулка; 16 — болт; 17 — разъем; 18 — заглушка; 19 — рукоятка; 20 — втулка

ния и обеспечить регулирование нейтрального положения якоря электрическим способом [7].

Крышка 1 и основание 2 ЭГМК соединены резьбой с неподвижной частью 3 (статором). Наличие в нижней части основания резьбы обеспечивает присоединение опорного кольца 4 с отверстиями, служащими для закрепления корпуса. Для лучшего теплоотвода на наружной поверхности корпуса предусмотрены ребра охлаждения. В корпусе размещены подвижная часть с магнитопроводом и статор с обмотками. Магнитопровод нижней половины подвижной части состоит из соединительной, резьбовой втулки 7 и сердечника 5 и залиты свинцом. Неподвижный магнитопровод (статор) состоит из продольно шихтованных сегментов, имеет две рабочие обмотки, соединенные последовательно-встречно, причем обмотки пропитаны эпоксидной смолой. Для вывода концов обмоток служат отверстие 9 и пазы 10 в статоре. Подвижная часть подвешена на упругих элементах типа текстолитовых мембран 12, имеющих форму дисков с пазами и отверстиями. Диафрагмы 12 крепятся винтами 13 на внутренней поверхности крышки и основания корпуса, соединяются с подвижной частью при помощи винтов 14 резьбой втулок 15. Для окончательного закрепления и фиксации элементов ЭГМК служит болт 16, находящийся в середине подвижной части.

Имеется возможность регулирования положения верхней и нижней половины подвижной части относительно статора и установки нейтрального положения половин подвижной части. Для доступа во внутреннюю полость корпуса с целью регулировки и настройки ЭГМК сделана заглушка 18, которая может быть заменена рукояткой 19 при транспортировке и переноске.

Принцип работы ЭГМК основан на обеспечении постоянного подмагничивающего потока с обеих сторон сердечника, создающего силы электромагнитного притяжения с обеих сторон якоря, одинаковые по величине, вследствие чего якорь остается в положении равновесия. На концы рабочих обмоток, включенных последовательно-согласованно, подается синусоидальное напряжение. При таком включении рабочих обмоток и обмоток подмагничивания в одной стороне статора переменный поток рабочих обмоток, создаваемый переменным током, складывается с постоянным потоком подмагничивания, а в другой стороне — вычитается из потока подмагничивания, тем самым вызывая появление результирующей электромагнитной силы то в одном, то в противоположном направлении, приво-

дящей к колебаниям подвижной части. Частота колебаний якоря соответствует частоте питающего напряжения.

ЭГМК создает динамическую силу не менее 500 Н при собственной массе 28 кг и массе подвижной части 12 кг. Диапазон рабочих частот — 30—600 Гц, коэффициент нелинейных искажений не более 0,5%, потребляемая полная электрическая мощность 300 ВА.

Кроме того, ЭГМК данной конструкции от электромагнитных устройств того же самого назначения отличает и возможность работы в любом пространственном положении не меняя своих характеристик, с ресурсом не менее 4000 ч.

Так как ЭГМК представляет собой одномассовую электро-механическую систему, дифференциальные уравнения движения можно выразить в виде

$$\xi + 2\beta\xi + \gamma^2\xi = v\Phi^2 - v\Theta^2; \quad (1)$$

$$\dot{\Phi} + \lambda(1 - \xi)\Phi = \lambda(u + \sin\tau); \quad (2)$$

$$\dot{\Theta} + \lambda(1 + \xi)\Theta = (-u + \sin\tau), \quad (3)$$

$$\text{где } \tau = \omega t; \quad \xi = \frac{x}{x_0}; \quad \Phi = \frac{RI}{u_a(1 - \xi)};$$

$$\Theta = \frac{RI}{u_a(1 + \xi)}; \quad u = \frac{U_0}{U_a} \text{ — безразмерные переменные и}$$

$$\lambda = \frac{\alpha R}{L_0 \omega}; \quad \beta = \frac{h}{2m\omega^2}; \quad \gamma = \sqrt{\frac{c}{m\omega^2}};$$

$$= \frac{L_0 U_a^2}{2x x_0^2 m \omega^2 R^2} \text{ — безразмерные параметры; } aL_0 \text{ — начальное}$$

значение индуктивности при $x = 0$; x_0 — начальный воздушный зазор в положении статического равновесия; x — текущее смещение реактивной части относительно корпусной, отсчитывается от положения статического равновесия; α — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние потоков рассеяния на индуктивность; ω — круговая частота; t — время; R — приведенное сопротивление рабочих и подмагничивающих обмоток каждой из половин статора; I — приведенный ток; u_a — амплитуда переменного напряжения; u_0 — постоянное подмагничивающее напряжение; m — масса подвижной части; h —

коэффициент сопротивления механическим колебаниям; c коэффициент жесткости упругих элементов.

Уравнения составлены для движения реактивной массы, так как считаем, что корпусная часть прикреплена к основанию большой массы, колебания которого незначительны по сравнению с реактивной массой.

Уравнения (2) и (3) представляют собой уравнения электрических цепей верхней и нижней половин двухтактного ЭГМК, а сила, действующая на реактивную массу, в уравнении (1) выражается через разность сил данных половин. Уравнения решались на ЭЦВМ ЕС-1020 с использованием модифицированного метода Хэмминга.

Исследования показали, что при работе с большими зазорами и индукциями, далекими от насыщения, зависимость силы от управляющего тока близка к линейной и при решении ряда задач можно считать ЭГМК линейным исполнительным элементом.

Довольно часто для решения некоторых задач необходимо возбуждение вращающегося вибрационного поля в плоскости. К таким ЭГМК относятся устройства с полым статором, внутри которого размещен цилиндрический якорь (рис. 3). Якорь

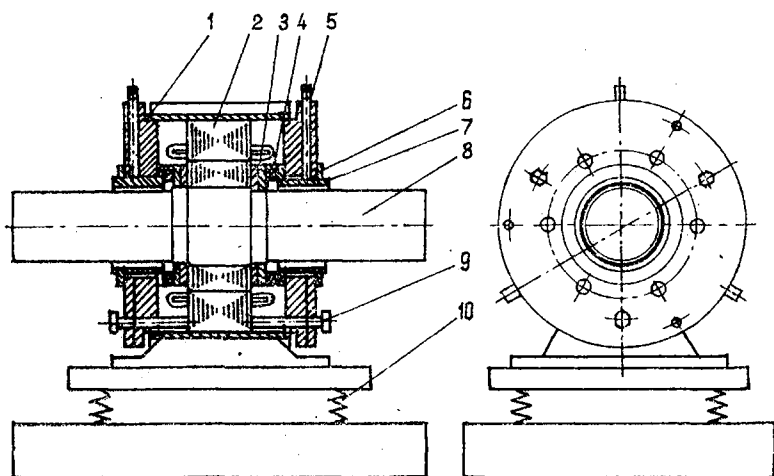


Рис. 3. ЭГМК с вращающимся вибрационным полем: 1 — фланец; 2 — статор; 3 — гайка крепления магнитной системы; 4 — кольцевые резиновые упругие элементы; 5 — винт; 6 — гайка; 7 — опорное кольцо; 8 — болт; 10 — упругий элемент крепления опоры

Может быть подвешен на упругих элементах или катиться в направляющих, размещенных по торцам статора. Статор в обоих случаях изготовлен из круглого магнитопровода, выполненный в виде полого цилиндра с пазами для укладки обмотки. В зависимости от способа включения обмоток устройства могут быть двухкоординатные (рис. 4, а) (обмотки

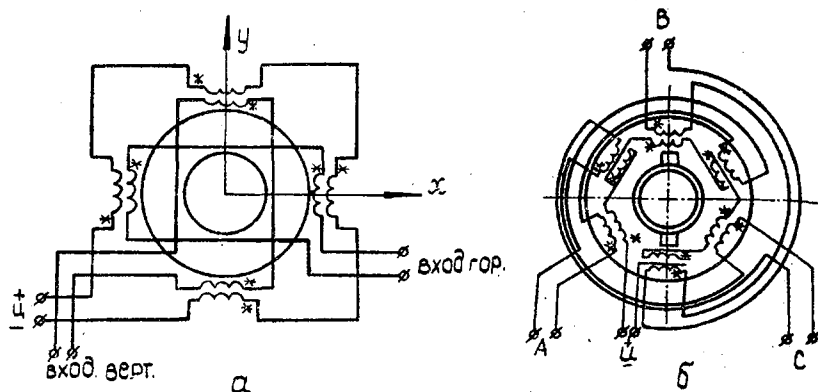


Рис. 4. Схемы включения обмоток ЭГМК с вращающимся вибрационным полем: а — двухкоординатный; б — трехфазный

включаются в четыре полюса, по два на каждую из координат, причем, на взаимно перпендикулярные координаты подаются напряжения, сдвинутые по фазе на 90°) и трехфазные (рис. 4, б) (обмотки включаются в шесть полюсов, по два на каждую из фаз трехфазной электрической сети). Другим достоинством данного устройства является то, что когда полюса набираются из отдельных обмоток, полная индуктивность получается меньше, чем в ЭГМК с одной обмоткой при такой же намагничивающей силе. Величина индуктивности играет большую роль при разработке усилителей мощности. Кроме того, при соответствующем подборе величин напряжений, подаваемых на полюса, можно получить вибрационное поле различной формы.

ЭГМК с вращающимся полем могут найти широкое применение не только для возбуждения вибраций, но и для активной виброзащиты. Созданы и исследованы системы активной виброзащиты с двухкоординатным гашением вибраций [12]. На базе проведенных исследований разработана система активной виброзащиты натурального турбогенератора, подавляю-

шая не менее чем на 20 дБ основную гармонику вибраций, создаваемых дисбалансом ротора и равную 50 Гц, а гармоники на частотах 100 и 150 Гц — на 8 дБ.

Наряду с проблемой создания качественно новых ЭГМК, появляется не менее сложная задача разработки мощных устройств питания, способных работать на индуктивную нагрузку, которой является ЭГМК.

Наиболее распространенными устройствами питания вибровозбудителей являются транзисторные и ламповые усилители. Однако они очень чувствительны к перенапряжениям на выходе и имеют ограниченное выходное напряжение. Хотя они успешно применяются для питания электродинамических вибростендов, но с ЭГМК работают ненадежно и часто выходят из строя, так как более пятидесяти процентов энергии с ЭГМК возвращается в питающее устройство. Кроме того, с повышением частоты необходимо высокое напряжение питания.

Исходя из данных особенностей ЭГМК, наиболее благоприятными устройствами питания являются тиристорные инверторы. С помощью тиристорного инвертора можно коммутировать достаточно высокие напряжения, а реактивную составляющую компенсировать конденсаторами.

За основу устройства питания нами принята мостовая схема автономного инвертора с параллельно нагрузке включаемой емкостью.

Устройство питания (рис. 5) работает следующим образом.

На трехфазный управляемый выпрямитель 1 подается трехфазное переменное напряжение. Амплитуда выпрямленного напряжения

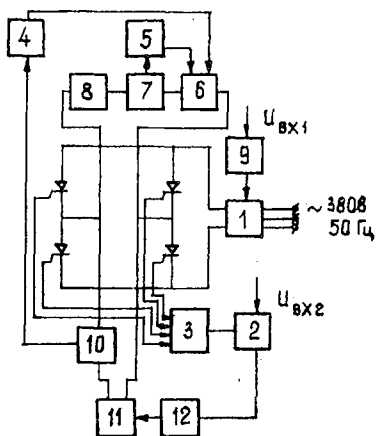


Рис. 5. Тиристорное устройство питания: 1 — выпрямитель; 2 — задающий генератор; 3 — формирователь импульсов; 4, 5 — усилители мощности; 6 — регулируемая индуктивность; 7 — датчик индуктивного тока; 8 — обмотки ЭГМК; 9 — блок регулирования; 10 — датчик емкостного тока; 11 — блок конденсаторов; 12 — блок измерения и сравнения

регулируется с помощью блока регулирования 9, на вход которого можно подавать напряжение управления $u_{вх1}$ от различных схем управления (в зависимости от области применения устройства). Выпрямленное напряжение подается на мостовую схему тиристорного преобразователя. Частота переключений тиристоров задается задающим генератором 2 или напряжением управления $u_{вх2}$, подаваемым на вход блока 2. В блоке 3 формируются импульсы управления тиристорным преобразователем. В диагонали преобразователя включена нагрузка: обмотки ЭГМК 8, последовательно которым включена регулируемая индуктивность 6 и датчик индуктивного тока 7. Для обеспечения на выходе преобразователя резонанса параллельно индуктивной цепи включен блок конденсаторов 11 и датчик емкостного тока 10. С изменением частоты коммутации преобразователя в блоке измерения и сравнения (частоты 12) вырабатывается сигнал, осуществляющий подключение очередной емкости блока конденсаторов 11 параллельно индуктивной ветви. Однако квантированного подключения конденсаторов недостаточно для достижения резонанса или необходимо большое количество ступеней.

Плавная настройка на резонанс в пределах одной ступени емкости осуществляется с помощью регулируемой индуктивности 6, на обмотки подмагничивания которой подаются напряжения с датчиков индуктивного 7 и емкостного тока 10, через усилители мощности 5 и 4. Данные напряжения соответствуют токам в индуктивной и емкостной цепях резонансного контура. Индуктивность изменяется, пока токи в индуктивной и емкостной цепях не выравниваются. Таким образом, при равенстве индуктивного и емкостного токов обеспечивается резонанс на выходе преобразователя. С помощью резонансного контура на выходе устройства питания компенсируется реактивная составляющая и с выпрямителя потребляется только активная мощность.

Основные технические данные устройства питания: активная мощность — 1000 Вт; выходной ток — 0—5 А; выходные напряжения — 0—200 В; диапазон рабочих частот в автоматическом режиме — 50—700 Гц.

Устройство питания успешно применяется для различных целей. В зависимости от области применения входные напряжения $u_{вх1}$ и $u_{вх2}$ формируются с помощью различных устройств управления.

Данные устройства питания с ЭГМК использованы для диагностирования и виброиспытаний конструкций летательных аппаратов, снятия остаточных напряжений в арматуре газо-

и нефтепроводов, а также для активной виброзащиты и вибро-технологии.

Управляемые вибросистемы, включающие ЭГМК и тиристорное устройство питания, показали себя надежными в эксплуатации и имеют малые габариты и массу. Габариты и масса тиристорного устройства питания в десять раз меньше, чем габариты и масса ламповых усилителей электродинамических вибростендов одинаковой мощности, а весогабаритные характеристики ЭГМК в пять раз лучше, чем эти же характеристики электродинамических вибростендов, имеющих такую же выталкивающую силу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин М. Д., Русаков А. М., Яблонский В. В. Электродинамические вибраторы. — М.: Машиностроение, 1975.
2. И. И. Быховский. Новые однотактные электромагнитные вибровозбудители. — М.: ЦНИИТЭстроймаш., 1972.
3. А. с. 587643. Электромагнитный возбудитель колебаний./В. С. Пашкявичюс, К. С. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, Шукалис А.-Ч. В. — Оpubл. в Б. И. 1978, № 1.
4. А. с. 7009000. Электромагнитный возбудитель колебаний/С. Ю. Кудараускас, В. С. Пашкявичюс, К. М. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, Шукалис А. — Ч. В. — Оpubл. в Б. И., 1979, № 44.
5. Гудонис И. Б., Пашкявичюс В. С., Стульпинас Б. Б., Шукалис А. — Ч. В. Новые электромагнитные вибровозбудители и их применение для активной виброзащиты, вибростарения и др. — В сб.: Тез. докл. Испытания и испытательное оборудование. — М.: Центр НИИ информации и техн.-экон. исследований, 1979.
6. Гудонис И. Б., Пашкявичюс В. С., Рагульскис К. М., Стульпинас Б. Б., Шукалис А. — Ч. В. Электромагнитный возбудитель колебаний. Положительное решение по заявке № 276959/18-10 от 22.05.79.
7. А. с. 687625. Двухконтактный электромагнитный возбудитель колебаний/И. Б. Гудонис, В. С. Пашкявичюс, К. М. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, Шукалис А. — Ч. В. — Оpubл. в Б. И., 1979, № 35.
8. Гудонис И. Б., Стульпинас Б. Б., Шукалис А.-Ч. В. К вопросу создания электромагнитных механизмов вращающегося вибрационного поля. — В сб.: Тез. докл. Основные направления повышения технического уровня и качества ручных машин. — М., 1979.
9. Гудонис И. Б., Пашкявичюс В. С., Рагульскис К. М., Стульпинас Б. Б., Шукалис А.-Ч. В. Электромагнитный возбудитель колебаний. Положительное решение по заявке № 2699006/18-10 от 19.12.78.
10. Гудонис И. Б., Стульпинас Б. Б., Шукалис А. — Ч. В. Исследование малогабаритных тиристорных преобразователей для питания электромагнитных возбудителей колебаний. — В сб.: Тез. докл. Основные направления повышения технического уровня и качества ручных машин. — М., 1979.
11. Генкин М. Д., Елезов В. Г., Замазовский С. Г., Пашкявичюс В. С., Стульпинас Б. Б., Фридман Э. Л., Шукалис А.-Ч. В., Яблонский В. В. Увеличение виброизоляции в модели упруго-подвешенного ротора с помощью управляемых компенсаторов. — В сб.: Методы создания машин в маломощном исполнении. — М.: Наука, 1978.