

Электродинамические громкоговорители с нанодисперсной магнитной жидкостью

Перминов С.М., канд. тех. наук

Рассмотрена конструкция электродинамического громкоговорителя с нанодисперсной магнитной жидкостью в зазоре. Проанализированы жидкости, используемые в громкоговорителях. Показаны основные отличительные особенности электродинамических громкоговорителей с нанодисперсной магнитной жидкостью.

Ключевые слова: нанодисперсная магнитная жидкость, зазор, громкоговоритель, магнитная система, ферромагнитная частица.

Electrodynamic speakers with nanodispersed magnetic liquid

Perminov S.M., Candidate of Engineering Science

The design of the electrodynamic speaker with nanodispersed magnetic liquid in a backlash is examined. The used liquids in speakers are analysed. Basic distinctive features of electrodynamic speakers with nanodispersed magnetic liquid are shown.

Keywords: nanodispersed magnetic liquid, clearance, speaker, magnetic system, ferromagnetic particle.

Введение. Мировой объем выпуска громкоговорителей достигает 500 млн штук в год, из них на долю российского производства приходится около 5 млн штук. Громкоговоритель представляет собой электроакустический преобразователь электрической энергии в звуковую. Известно несколько типов громкоговорителей, отличающихся методом преобразования электрической энергии: электромагнитные, пьезоэлектрические, электростатические, термоионные, электродинамические и др. На долю электродинамических катушечных громкоговорителей приходится более 85 % общего производства.

Принцип устройства электродинамического громкоговорителя. Основные элементы электродинамического громкоговорителя (ЭДГ) были разработаны в сер. 20-х гг. XX в. С этого момента появились сотни патентов, касающихся усовершенствования отдельных элементов громкоговорителя, однако принцип его устройства остался неизменным. В 80-х годах, когда появились устойчивые магнитные жидкости (МЖ), провели эксперимент – в рабочий зазор электродинамического громкоговорителя ввели МЖ. Основная цель эксперимента заключалась в улучшении отвода тепла от электрической катушки. Теплопроводность жидкостей выше теплопроводности воздуха. МЖ, обладая магнитными свойствами, удерживается магнитным полем в рабочем зазоре независимо от положения громкоговорителя с пространстве. Результаты эксперимента оказались настолько успешными, что в настоящее время практически всеми ведущими производителями мира выпускаются ЭДГ с магнитными жидкостями.

ЭДГ состоит из трех основных частей (рис. 1): магнитной системы 1, подвижной системы 2 и диффузородержателя 3 [1]. Подвижная система ЭДГ включает в себя диффузор 4, звуковую катушку 5, центрирующую шайбу 6, пьезозащитный колпак 7.

Магнитная система ЭДГ (рис. 2) состоит из постоянного магнита 8, верхнего фланца 9, нижнего фланца 10, керна 11. Верхний фланец 9 и kern 11 образуют рабочий зазор 12, в который помещена

звуковая катушка 5. В ЭДГ с магнитной жидкостью последнюю помещают в зазор 12.

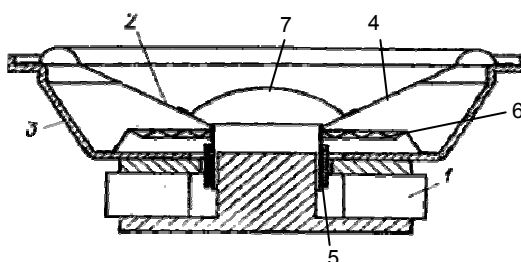


Рис. 1. Конструкция электродинамического громкоговорителя

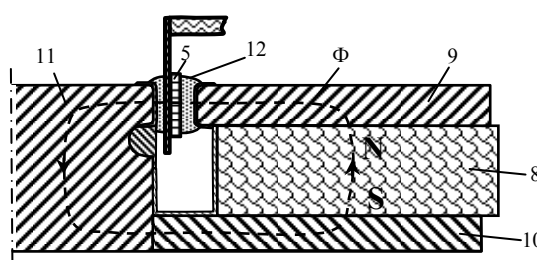


Рис. 2. Магнитная система электродинамического громкоговорителя

Принцип действия ЭДГ основан на взаимодействии переменного тока катушки с постоянным магнитным полем рабочего зазора магнитной системы. Постоянный магнит 8 является источником магнитного поля системы. Магнитный поток Φ , создаваемый магнитом, замыкается через верхний фланец 9, рабочий зазор 12, kern 11, нижний фланец 10. В рабочем зазоре находится цилиндрическая звуковая катушка 5, жестко связанная с диффузором 4. Звуковая катушка 5 расположена по середине кольцевого зазора, благодаря наличию центрирующей шайбы 6. Звуковая катушка 5 вместе с

диффузором 4 и центрирующей шайбой 6 образует подвижную систему головки. Переменный электрический ток, протекающий по звуковой катушке 5, взаимодействует с магнитным полем магнитной системы, приводит в движение диффузор 4. Колебания диффузора 4 возбуждают в окружающем воздушном пространстве звуковые волны, воспринимаемые человеческим ухом как звуки.

Сила взаимодействия переменного тока, протекающего по звуковой катушке, и постоянного магнитного поля рабочего зазора F пропорциональна магнитной индукции B в рабочем зазоре, длине проводника звуковой катушки L и току I .

$$F = B L I. \quad (1)$$

Сила F приводит в движение диффузор массой m , придавая ему ускорение a .

Чем меньше масса диффузора и звуковой катушки, тем с большим ускорением они совершают колебания, тем выше звуковое давление, создаваемое головкой:

$$a = F/m. \quad (2)$$

Согласно (1), для повышения электромагнитной силы, действующей на звуковую катушку, необходимо повышать индукцию в рабочем зазоре и силу тока в катушке. Ток в катушках ЭДГ значителен. Благодаря хорошему отводу тепла, даже в зазоре, заполненном воздухом, плотность тока достигает 30–90 А/мм², что практически на порядок превышает плотность, используемую в других электромеханических устройствах, допустим, в электрических машинах. Значение средней индукции в рабочем зазоре наиболее массовых ЭДГ лежит в диапазоне 0,6–1,5 Тл и зависит, в первую очередь, от свойств используемого материала постоянного магнита, магнитопроводящих свойств керна, фланцев, размеров конструктивных элементов магнитной системы.

Магнитные жидкости, предназначенные для ЭДГ. Под МЖ в радиотехнике понимают как магнитные суспензии (МС), так и коллоидные растворы. Суспензия – это грубодисперсная система частиц твердой дисперсной фазы с размерами частиц, меняющимися в очень широких пределах (от 0,02 до 10 мкм), и жидкой дисперсионной среды. В качестве дисперсионной среды используются минеральные или кремнийорганические масла. Если частицы выполнены из ферромагнитного порошка, то суспензия реагирует на воздействие магнитного поля. Для магнитных суспензий характерно сильное диполь-дипольное взаимодействие ферромагнитных частиц и образование пространственных структур в виде цепей и кластеров. Такие системы неустойчивы и быстро расслаиваются. Наложение магнитного поля лишь ускоряет образование структур и процесс отделения ферромагнитных частиц от жидкой дисперсионной среды. Для придания устойчивости в дисперсионную среду добавляют поверхностно активные вещества (ПАВ) и структурообразующий наполнитель. ПАВ повышает взаимосвязь частиц с жидкой дисперсионной средой. Структурообразующий наполнитель придает дисперсионной среде желеобразные свойства. Ферромагнитные частицы, распределенные в желеобразной среде, не оседают, благодаря упругим свойствам дисперсионной среды. Кроме ферромагнитных частиц в суспензию могут входить и немагнитные частицы, влияющие на вязкостные и теплофизические свойства системы (как это было использовано в специальном составе для заполнения зазора магнитной цепи динамического громкоговорителя [2]). Такая суспензия сохраняет

седиментационную устойчивость даже при полном агрегировании частиц в магнитном поле. Но связь ферромагнитных частиц с дисперсионной средой в такой системе достаточно слабая. Система, устойчивая в замкнутом пространстве, быстро разрушается под влиянием внешних воздействий при наличии свободных границ. Поэтому при заполнении рабочего зазора магнитной цепи ЭДГ суспензией под воздействием движущейся катушки, температурных полей, вибрации головки происходит постепенный вынос дисперсионной среды из зазора, хотя ферромагнитные частицы остаются по-прежнему в зазоре. Этот процесс приводит к изменению вязкостных и теплопроводных свойства системы, в конечном итоге ухудшаются акустические характеристики громкоговорителя.

Первые образцы устойчивого коллоида ферромагнитных частиц [3], которые получили название магнитные жидкости, были получены в 60-е годы. Магнитные жидкости являются раствором ферроили ферримангнетика с размером частиц около 10 нм в жидкости-носителе [4]. Частицы с такими малыми размерами являются однодоменными. Это означает, что вещество внутри частицы предельно намагничено в одном направлении и каждая частица представляет собой постоянный магнит с наноразмерами. Если поместить миллионы таких постоянных магнитов в любую жидкую среду, то под действием сил магнитного взаимодействия рядом расположенные частицы начнут ориентироваться друг к другу разноименными полюсами, притягиваться, слипаться, образовывать крупные конгломераты, которые под действием сил тяжести через какое-то время выпадут в осадок. Чтобы исключить данные процессы, каждую частицу покрывают защитным адсорбционным слоем ПАВ, этот слой не только ограничивает сближение частиц, но и отталкивает соседние частицы при их сближении. Седиментационная устойчивость МЖ обусловлена использованием частиц коллоидальных размеров. Условие существования коллоидного раствора предполагает прежде всего, что взвешенные в жидкости твердые частицы должны быть достаточно малы, чтобы броуновское (тепловое) движение молекул жидкости препятствовало оседанию частиц в поле тяжести. Намагниченность МЖ зависит в основном от объемной концентрации и материала частиц, их размера, величины напряженности приложенного внешнего магнитного поля и дезориентирующего действия теплового движения. Коллоидные растворы обладают устойчивостью как в магнитном поле, так и вне магнитного поля, что обеспечивает стабильность характеристик устройств с их применением, в том числе и ЭДГ. Чем же отличаются свойства магнитных жидкостей от свойств магнитных суспензий. Во-первых, устойчивостью во времени, что наиболее важно. Во-вторых, намагниченностью. Предельная намагниченность в сильных магнитных полях, которая называется намагниченностью насыщения, у МЖ примерно в 3–10 раз ниже, чем у МС. В-третьих, эффективной вязкостью и степенью ее изменения в магнитном поле. Вязкость как МЖ, так и МС определяется вязкостью дисперсионной среды, концентрацией твердых частиц, их размером, формой, толщиной защитных оболочек, магнитными свойствами материала частиц и рядом других свойств. Главное отличие МЖ и МС заключается в их реакции на магнитное поле. Вязкость МС при наложении на нее магнитного поля может возрастать в сотни раз. Для

МЖ этот эффект значительно меньше и может укладываться в 10–30 % от номинального значения.

Исходя из выше изложенного, можно сделать следующие выводы. Введение в рабочий зазор ЭДГ магнитных суспензий не гарантирует стабильности характеристик громкоговорителя во времени из-за неустойчивости МС. Кроме этого, магнитное поле зазора отличается высокой напряженностью, и МС, обладая высоким магнитореологическим эффектом, будет создавать ощутимое сопротивление движению звуковой катушки. Это приведет к дополнительным тепловыделениям в зазоре, снижению амплитуды колебаний звуковой катушки и снижению звукового давления, создаваемого головкой. Коллоидный раствор магнитных частиц – магнитные жидкости – будет обеспечивать более стабильные временные характеристики ЭДГ, значительно меньшее сопротивление движению звуковой катушки. Разница в теплопроводности суспензии и коллоидального раствора при одинаковой концентрации твердой фракции будет незначительная, в пользу суспензии.

Сравнительный анализ свойств магнитных суспензий и магнитных коллоидов указывает в пользу последних для применения в ЭДГ.

К каким же результатам приводит введение нанодисперсных МЖ в рабочий зазор ЭДГ.

Теплоотвод. Звуковая катушка ЭДГ работает в тяжелом тепловом режиме. Ее температура может достигать 150⁰С на предельных режимах громкости звучания, поэтому все элементы катушек выполняются из теплостойких материалов и покрытий. Введение в зазор между звуковой катушкой и поверхностью магнитопровода магнитной системы среды с теплопроводностью в 5–7 раз выше, чем воздух, позволяет эффективно передать выделившееся в катушке тепло на детали магнитной системы, которые имеют достаточно развитые поверхности и хорошо рассеивают тепло в окружающее пространство. Качественный теплоотвод исключает перегрев катушки и повышает надежность ЭДГ. Введение МЖ в зазор магнитной системы позволило производителям значительно повысить мощность ЭДГ при сохранении исходных габаритов.

Повышение индукции рабочего зазора. Замена немагнитного воздуха в рабочем зазоре ЭДГ на среду, обладающую магнитными свойствами, повышает магнитную проводимость зазора и, соответственно, индукцию в зазоре. Согласно (1), возрастает и сила, действующая на звуковую катушку, при одном и том же токе катушки. Исследования показали, что увеличение индукции оказалось незначительным. Дело в том, что МЖ в зазоре находится в состоянии насыщения, и ее магнитная проницаемость мала. Кроме этого, звуковая катушка, а также ее каркас выполнены из немагнитных материалов и занимают основной объем пространства зазора. При общей величине рабочего зазора около 2 мм МЖ занимает только 0,15–0,4 мм. Введение МЖ вызывает рост индукции в рабочем зазоре на 1–6 %, в зависимости от конструкции магнитной системы и используемой МЖ.

Демпфирование и стабилизация подвижной системы ЭДГ. При преобразовании электрического сигнала в звуковой возникают нелинейные искажения, характеризующиеся возникновением в воспроизводимом спектре частот новых составляющих, загрязняющих звук хрипами и дребезжанием. Продуктами нелинейных искажений являются гармоники частоты, в 2, 3 и более раз превышаю-

щие частоты подводимого сигнала или комбинационные частоты. Источником искажений является нелинейность гибкости подвесов подвижной системы, она нарушает пропорциональность между электродинамической силой и перемещениями. Другой источник искажений – непостоянство магнитной индукции в кольцевом зазоре и сечении катушки по ее высоте. Неоднородность магнитного поля определяется конструкцией магнитной системы. Непостоянство сечения катушки по ее высоте связано с профилем провода и качеством намотки катушки. Искажения могут также обуславливаться нелинейной упругостью воздуха в замкнутом объеме под гофрированной центрирующей шайбой или в замкнутом объеме корпуса громкоговорителя. Существует и ряд других источников искажений. Замена среды, в которой находится катушка, на более вязкую (вязкость воздуха примерно на три порядка ниже вязкости жидких сред) позволяет существенно снизить высокочастотные паразитные колебания катушки и стабилизировать всю подвижную систему ЭДГ. При этом искажения существенно снижаются, повышается качество звучания [5].

Повышение резонансной частоты. Испытания ЭДГ, проведенные Российской электро-акустической лабораторией, показали, что введение в зазор МЖ приводит к повышению резонансной частоты ЭДГ в среднем на 25–45 %, причем резонанс очень сильно подавлен магнитожидкостным демпфированием. Начальный и конечный участки частотной характеристики практически совпадают [5].

Снижение добротности. Полная добротность – соотношение упругих и вязких сил в подвижной системе динамика вблизи частоты резонанса. Чем выше добротность, тем выше упругость в динамике и тем активнее он звучит на резонансной частоте. Полная добротность складывается из механической и электрической добротностей. Механическая добротность – это упругости подвеса и гофры центрирующей шайбы. Она составляет 10–15 % полной добротности. Все остальное – электрическая добротность, образованная магнитом и катушкой динамика.

Наличие МЖ в зазоре привело к существенно снижению механической добротности (3,5–5 раз), при этом полная добротность уменьшилась примерно, в 1,1–1,7 раза.

Чувствительность ЭДГ – уровень звукового давления, развиваемого громкоговорителем. Измеряется на расстоянии 1 м при подводимой мощности 1 Ватт и частоте 1 кГц (обычно). Чем выше чувствительность, тем громче играет система. Испытания показали, что чувствительность ЭДГ практически не меняется: максимально измеренное отклонение составило 0,3 %.

Центрирование звуковой катушки в рабочем зазоре. Центрирование звуковой катушки в зазоре обычно обеспечивается центрирующей шайбой. Звуковая катушка не должна соприкасаться ни с керном, ни с фланцем. При введении МЖ в зазор возникают дополнительные силы, центрирующие звуковую катушку. Дело в том, что на немагнитное тело, погруженное в МЖ, находящуюся в неоднородном магнитном поле, действует магнитостатическая выталкивающая сила. Сила стремится переместить тело в зону с меньшей напряженностью магнитного поля.

Звуковая катушка и каркас выполнены из немагнитных материалов. Магнитное поле зазора ЭДГ неравномерно, напряженность поля около поверхно-

сти фланца выше, чем в центре зазора, поэтому любое отклонение катушки от центра приводит к возникновению сил, стремящихся вернуть ее в исходное положение.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы. Несмотря на устойчивый консерватизм конструкции ЭДГ, МЖ успешно внедрились в состав их магнитных систем. Для использования в ЭДГ нанодисперсные МЖ предпочтительнее МС. Введение в рабочий зазор ЭДГ МЖ позволило существенно улучшить теплоотвод динамических катушек и поднять выходную мощность громкоговорителей. Присутствие МЖ отразилось на большинстве характеристик ЭДГ, в том числе и на акустических. Следовательно, появился новый путь совершенствования параметров ЭДГ через свойства применяемой магнитной жидкости.

Перминов Сергей Михайлович,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Список литературы

1. **Эфрусси М.М.** Громкоговорители и их применение. – М.: Энергия, 1976.
2. **Патент** РФ №2034411. Состав для заполнения зазора магнитной цепи динамического громкоговорителя. Шульман З.П. и др. Кл. H04R9/02.
3. **Papell S.S.** Low Viscosity Magnetic Fluid Obtained by the Colloidal Suspension of Magnetic Particles / US Patent, No. 3215572, 1965.
4. **Rosensweig R.E.** Magnetic Fluids // Int. Sci. Tech., – 1966. – № 55. – P. 48–56.
5. **The construction** of electrodynamic loud speaker is considered with nanodispersnoy magnetic zhidko-st'yu in a gap. Liquids, in-use in loud speakers, are analysed. The basic otlichi-tel'nye features of electrodynamic loud speakers are rotined with a nanodispersnoy magnetic liquid. <http://www.ferrolabs.com/ru>