

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 81 страницу, 17 рисунков, 11 таблиц, 6 приложений, 13 источников.

Ключевые слова: ВИБРОСТРУЙНАЯ МАГНИТНАЯ АКТИВАЦИЯ, МОДУЛЬ ВИБРООБРАБОТКИ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, РЕЗОНАНС, АМПЛИТУДА КОЛЕБАНИЙ, ЭЛЕКТРОПРИВОД.

Цель работы – провести расчет и исследование электропривода резонансного вибратора модульного типа, предназначенного для разгрузки вязких жидкостей (на примере нефти) из железнодорожных цистерн, и выбрать необходимое силовое оборудование.

В работе разработана математическая модель, которая позволяет исследовать режимы работы вибратора, произведен выбор преобразователя частоты и других элементов электропривода.

С помощью математической модели, решаемой в программе Mathcad 15, проведено исследование режимов работы установки, получены основные параметры, необходимые для выбора силового оборудования электропривода.

Выпускная квалификационная работа выполнена с помощью пакета программ: Microsoft Word 2010, Microsoft office Excel 2010, Mathcad 15, AutoCAD 2016.

## **Введение**

Жидкость — вещество, находящееся в жидком агрегатном состоянии, занимающем промежуточное положение между твёрдым и газообразным состояниями. Основным свойством жидкости, отличающим её от веществ, находящихся в других агрегатных состояниях, является способность неограниченно менять форму под действием касательных механических напряжений, даже сколь угодно малых, практически сохраняя при этом объём. [7].

Жидкое состояние обычно считают промежуточным между твердым телом и газом: газ не сохраняет ни объём, ни форму, а твёрдое тело сохраняет и то, и другое. Форма жидких тел может полностью или отчасти определяться тем, что их поверхность ведёт себя как упругая мембрана. Так, вода может собираться в капли. Но жидкость способна течь даже под своей неподвижной поверхностью, и это тоже означает не сохранение формы (внутренних частей жидкого тела). Молекулы жидкости не имеют определённого положения, но в то же время им недоступна полная свобода перемещений. Между ними существует притяжение, достаточно сильное, чтобы удерживать их на близком расстоянии.

Вещество в жидком состоянии существует в определённом интервале температур, ниже которого переходит в твердое состояние (происходит кристаллизация либо превращение в твердотельное аморфное состояние-стекло), выше-в газообразное (происходит испарение). Границы этого интервала зависят от давления. Как правило, вещество в жидком состоянии имеет только одну модификацию.

Жидкости играют важную роль во многих технологических процессах. Особенности применения жидкостей во многом определяются их свойствами. Свойства жидкостей могут быть естественными или специально создаваемыми. Для последних применяются многообразные технологии и устройства, в основе

работы которых лежит использование различных физико-химических воздействий.

Особый интерес в этом отношении представляет нефть и нефтепродукты, требующие во многих случаях изменение свойств, облегчающих их использование [2].

### *Основные физические свойства нефтей*

На технологию транспорта и хранения нефтей в той или иной мере влияют их физические свойства (плотность, вязкость, испаряемость, пожаровзрывоопасность, электризация, токсичность).

Плотность нефтей при 20 °С колеблется в пределах от 760 до 940 кг/м<sup>3</sup> (табл. 12.3). С увеличением температуры она уменьшается. От правильного определения плотности нефти в резервуарах зависит точность ее учета, а в конечном счете - прибыль предприятия.

Вязкость - один из важнейших параметров нефти. От нее зависит выбор технологии перекачки, энергозатраты на транспортировку нефти и др.

Вязкость нефтей России при 20 °С в 1,3-310 раз превышает вязкость воды. Величина вязкости предопределяет способ транспортировки нефтей по трубопроводам. Маловязкие нефти перекачивают при температуре окружающей среды без предварительной обработки, а высоковязкие нефти перекачивают одним из следующих способов: в смеси с маловязкими разбавителями, после предварительной механической или термической обработки, с предварительным подогревом и др. (подробнее эти способы рассмотрены ниже).

Температура застывания имеет существенное значение для транспортирования нефти, так как по мере приближения к ней фактической температуры жидкости затрудняется или становится невозможным ее перемещение. Переход нефти из одного агрегатного состояния в другое совершается не при одной постоянной температуре, а в некотором интервале их значений. Поэтому температура застывания является условной величиной. Она

зависит главным образом от химического состава нефти и от содержания в ней парафина и смол.

Температурой застывания нефти принято считать температуру, при которой нефть, налитая в пробирку стандартных размеров, остается неподвижной в течение одной минуты при наклоне пробирки под углом 45 °.

Температура застывания маловязких нефтей составляет до -25 °С и поэтому их можно транспортировать при температуре окружающей среды. С увеличением содержания парафина температура застывания увеличивается. Для нефтей полуострова Мангышлак она достигает до +30 °С. Их можно перекачивать только специальными методами [13].

Испаряемость - свойство нефтей и нефтепродуктов переходить из жидкого состояния в газообразное при температуре меньшей, чем температура кипения. Испарение углеводородных жидкостей происходит при любых температурах до тех пор, пока газовое пространство над ними не будет полностью насыщено углеводородами.

Скорость испарения нефтей и нефтепродуктов зависит, в основном, от содержания в них легких фракций (пропан, бутаны) и от температуры.

Пожаровзрывоопасность нефтей и нефтепродуктов характеризуется способностью смесей их паров с воздухом воспламеняться и взрываться.

Пожароопасность нефтей и нефтепродуктов определяется величинами *температур вспышки, воспламенения и самовоспламенения*.

Под *температурой вспышки* паров понимают температуру, при которой пары жидкости, нагретой при определенных условиях, образуют с воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней открытого пламени. Углеводородные жидкости с температурой вспышки 61 °С и ниже относятся к легковоспламеняющимся, выше 61 °С - к горючим.

Под *температурой воспламенения* понимают температуру, при которой жидкость при поднесении открытого пламени горит. Обычно температура воспламенения на 10-50 °С выше температуры вспышки.

Под *температурой самовоспламенения* понимают температуру нагрева жидкости, при которой ее пары воспламеняются без поднесения открытого огня. В зависимости от температуры воспламенения установлено пять групп пожароопасных смесей:  $T_1 > 450$  °С;  $T_2 = 300 - 450$  °С;  $T_3 - 200 - 300$  °С;  $T_4 - 135 - 200$  °С;  $T_5 - 100 - 135$  °С [16].

Взрывоопасность нефтей и нефтепродуктов характеризуется величинами *нижнего и верхнего пределов взрываемости*.

Нижний предел взрываемости - это концентрация паров жидкости в воздухе, ниже которой не происходит вспышки смеси из-за избытка воздуха и недостатка паров при внесении в эту смесь горящего предмета.

Верхний предел взрываемости соответствует такой концентрации паров нефти и нефтепродуктов в воздухе, выше которой смесь не взрывается, а горит. Значения концентрации паров между нижним и верхним пределами взрываемости называют интервалом взрываемости. Для нефтей и нефтепродуктов интервал взрываемости составляет от 2 до 10 %.

Электризация углеводородных жидкостей обусловлена их высоким электрическим сопротивлением, т. е. диэлектрическими свойствами. При трении их частиц между собой, о стенки трубопроводов и емкостей, а также о воздух возникают заряды статического электричества величиной до нескольких десятков киловольт. Для воспламенения же достаточно разряда мощностью 4-8 кВт.

Применяют, в основном, два метода защиты от разрядов статического электричества: заземление токопроводящих элементов оборудования и ограничение скоростей перекачки (не более 10 м/с)

Токсичность нефтей и нефтепродуктов заключается в том, что их пары оказывают отравляющее действие на организм человека. При этом наблюдается повышенная заболеваемость органов дыхания, функциональные изменения со стороны нервной системы, изменение кровяного давления и замедление пульса.

Предотвращение отравлений персонала обеспечивается усиленной вентиляцией производственных помещений, а также применением изолирующих или фильтрующих противогазов при работе в опасной для здоровья атмосфере [7].

#### *Перекачка высоковязких и высокозастывающих нефтей и нефтепродуктов*

Перекачка таких нефтей по трубопроводам обычным способом затруднена. Для осуществления их транспортировки применяют следующие способы повышения текучести нефтей: смешение вязких с маловязкими и совместная их перекачка; смешение и перекачка с водой; термообработка вязких нефтей и последующая их перекачка; перекачка предварительно нагретых нефтей; добавление присадок – депрессаторов; различные физико-химические воздействия на реологические свойства жидкости .

Сущность способа смешения и перекачки с водой в том, что высоковязкая нефть и вода смешиваются перед прокачкой в такой пропорции, чтобы образовалась эмульсия типа «нефть в воде». В этом случае капли нефти окружены водяной пленкой и поэтому контакта нефти со стенкой трубы не происходит.

Технология *горячей перекачки* заключается в снижении вязкости и уменьшении гидравлического сопротивления при подогреве нефти, используется на ряде действующих нефтепроводов [9].

Перекачка с разбавителями – позволяет довольно существенно снизить вязкость и температуру застывания нефти. Это связано с тем, что, во-первых, понижается концентрация парафина в нефти, т.к. часть его растворяется легкими фракциями разбавителя. Во-вторых, при наличии разбавителя асфальто – смолистых веществ последние, адсорбируясь на поверхности кристаллов парафина, препятствуют образованию прочной структурной решетки..

Перекачка термообработанной нефти. Термообработкой называется тепловая обработка высокопарафинистой нефти, предусматривающая её нагрев до температуры, превышающей температуру плавления парафинов 55-60°C, и

последующее охлаждение с заданной скоростью, для улучшения реологических параметров.

Принцип действия депрессорных присадок в снижении температуры застывания масел. Присадки вводятся в нефть при температурах 60...70 °С, когда основная масса парафинов находится в растворенном состоянии. При последующем охлаждении молекулы присадок адсорбируются на поверхности выпадающих из нефти кристаллов парафина, мешая их росту. В результате образуется текучая суспензия кристаллов парафина в нефти [8].

Основные рассмотренные методы снижения вязкости нефтей и нефтепродуктов базируются на их нагреве до температур, превышающих температуру кристаллизации парафинов. Энергия, затрачиваемая на это, составляет существенные значения.

Применение депрессорных присадок является так же затратным из-за высокой стоимости.

Поэтому поиск методов и технологий, способных решить проблему снижения вязкости нефтей и нефтепродуктов, является актуальной и в настоящее время.

Масштабной задачей в отношении проблем снижения вязкости нефтепродуктов является решение задачи транспортирования нефтей и нефтепродуктов железнодорожным транспортом, особенно в зимних условиях. Главной проблемой при этом является разгрузка нефтепродуктов из железнодорожных цистерн. Длительность разгрузки цистерн может составлять до нескольких суток с колоссальными затратами тепловой энергии и наличием специальных габаритных построек.

Поэтому любые предложения в этой области заслуживают особого внимания и оценки.

## **Глава 1. ТЕХНОЛОГИЯ ВИБРОСТРУЙНОЙ МАГНИТНОЙ АКТИВАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ (ВСМА)**

Одним из способов физико-химического воздействия на реологические свойства нефти, обеспечивающих снижение вязкости нефтепродуктов, является технология ВСМА.

Технология ВСМА — это запатентованный способ многокомпонентного физико-химического воздействия на сложные жидкие системы, применяемый для изменения их реологических свойств и получения требуемых параметров. Технология ВСМА обеспечивает: диспергацию дисперсных составов на микронном уровне, высокоэффективное и производительное получение или разрушение устойчивых надмолекулярных структур различных жидких систем, интенсификацию массообменных процессов.

Технология ВСМА реализуется устройствами ВСМА модульного типа, распределяемыми по всему объему обрабатываемой жидкой среды [8].

### **1.1 Влияние технологии ВСМА на фракционный состав нефти**

В статье [8] представлен способ воздействия на нефть и нефтепродукты комплексом физических полей. Проведенные исследования показывают, что виброструйная магнитная активация нефти изменяет фракционный состав нефти, изменяются температура застывания и температура начала кипения, увеличивается выход «светлых» фракций до 20%. Увеличение объема конденсата напрямую зависит от количества энергии физических полей, переданной нефти, а удельная энергоемкость процесса зависит от физико-химических свойств и от группового состава нефти.

В настоящее время интенсифицировались научные разработки с применением нетрадиционных методов активации нефти, нефтяных остатков и донных отложений. Любое изменение реологических и физико-химических свойств нефтяных дисперсных систем (НДС) сопровождается сообщением в систему

энергии посредством теплового, механического, электронного, электромагнитного, акустического, кавитационного, радиационного, химического воздействия. Эволюция структурного и химического состояний, устойчивости НДС зависит от вида воздействия, устройства, посредством которого передается энергия, от времени передачи энергии и от количества энергии, сообщенной среде [6].

В последнее время из многочисленных способов изменения реологических свойств НДС находит широкое применение такой вид комплексного физического воздействия, как метод виброструйной магнитной активации. ВСМА создает комплексное воздействие на среду: высокие сдвиговые скорости; акустическое поле; мощное магнитное поле; знакопеременное компрессионное воздействие. Применение таких видов физических воздействий создает условия для достижения предельного уровня разрушения структуры молекулярных кристаллов парафиновых углеводородов и поддержания этого уровня в течение времени, необходимого для осуществления массообменных процессов. Вибрационное воздействие с определенной энергией вследствие разрушения кристаллических структур может привести к сильному изменению структурно-вязкостных свойств нефти и даже изменить групповой и фракционный состав.

К настоящему времени достаточно глубоко изучена зависимость реологических свойств высокопарафинистых нефтей от влияния вибрационных воздействий. Научно-исследовательские работы в области механики полимеров показали, что, варьируя интенсивностью внешних механических воздействий, можно в широком диапазоне управлять реологическими свойствами структурированных систем. Это можно использовать при решении таких актуальных вопросов трубопроводного транспорта, как откачка высокопарафинистой нефти из нефтехранилищ, пуск нефтепроводов после длительных остановок и уменьшение парафинизации трубопроводов [8].

Колебательная система, состоящая из вибрирующего конфузора (активатора), упругих элементов и моторной части, погружена в среду, которая является объектом воздействия. Энергия, необходимая для поддержания устойчивых возвратно-колебательных движений активатора, передается в систему магнитным полем. Воздействие осуществляется на частоте собственных колебаний механической системы, зависящей в том числе и от механических свойств среды: плотности, вязкости, статического напряжения сдвига. Высокая эффективность данной технологии определяется интенсивным комплексным воздействием физических полей на среду и резонансным режимом работы системы, даже при относительно невысоких значениях частоты воздействия ( $f = 50$  Гц).

В процессе виброструйной обработки механическое воздействие разрушает надмолекулярную структуру среды (нефти), а мощное импульсное электромагнитное поле сообщает частицам нефти кинетическую и потенциальную энергию и переводит их в возбужденное метастабильное состояние. Высокая сдвиговая скорость протекания нефти через магнитный поток, высокие удельные магнитные параметры магнитной системы позволяют воздействовать на среду с высокими энергиями. Колебательная система настраивается на резонансную частоту, равную промышленной частоте электрической сети 50 Гц.

Область механических, электромеханических и акустических воздействий устройства на среду, образованная поверхностью моторной части и активатором.

Данная область характеризуется следующим комплексом физических воздействий: знакопеременным давлением под активатором, сдвиговой скоростью, магнитным полем, акустическим полем. Физическая картина процесса описывается следующими параметрами: электромагнитная сила притяжения рабочего органа —  $F_{эм}$ ; направленное движение частиц среды со скоростью  $v(t)$ ; скорость движения среды при выходе из сопла активатора  $V_c(t)$ ;

знакопеременное давление в зоне активации  $P(t)$ ; деформация среды со сдвиговой скоростью  $(t)$ ; магнитный поток  $\Phi(t)$  с индукцией в зазоре  $B(t)$ .

Эффективность технологии ВСМА проверялась на ряде объектов РФ в лабораторных и промышленных условиях [10].

Многокомпонентное физическое воздействие ВСМА характеризуется предельными значениями параметров:

- скорость затопленных струй до 10 м/с;
- сдвиговая скорость до  $15 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ ;
- ускорение рабочего органа до 100 g;
- перепад давления в зоне активации до 3 атм.;
- магнитная индукция в зоне активации до 1,9 Тл;
- частота основного воздействия 50 Гц;
- частота модуляции основного воздействия от 0,1 до 10 Гц.
- Регулирование параметров электрической сети питания устройства ВСМА позволяет изменять уровень физического воздействия в широких пределах.

Технология ВСМА при этом обеспечивает существенное повышение эффективности применения различных химических добавок-реагентов [6].

## **1.2 Аналог устройства разжижения нефтепродуктов**

Примером такого устройства является вибратор электромагнитный активационный ВЭМА-0,3.

Вибратор ВЭМА-0,3 предназначен для применения в нефте-и газодобывающей, химической и нефтехимической отраслях. Вибратор ВЭМА-0,3 обеспечивает высокоэффективную обработку (диспергирование и снижение вязкости) различных многокомпонентных вязких жидких составов и растворов (нефть, нефтешлам, эмульсии, краски, суспензии и т. д.). ВЭМА-0,3 является регулируемым электромеханическим прибором вибрационного типа

погружного исполнения. ВЭМА-0,3 легко переустанавливается и состоит из блоков виброобработки и питания. Вибратор ВЭМА-0,3 изготовлен по Патенту России RU № 2208474 и не имеет аналогов.

ВЭМА-0,3 предназначен для применения в следующих технологиях:

- механизированная очистка резервуаров и емкостей от донных осадков;
- подготовка товарной нефти (дегазация, обезвоживание, обессоливание);
- подготовка нефти к транспорту (снижение вязкости и АСПО);
- утилизация нефтешламов (осреднение, снижение вязкости, отделение механических примесей);
- приготовление жидких многокомпонентных химических составов и растворов;
- приготовление промывочных и цементных растворов высокой однородности;
- приготовление высококачественных полимерных составов и водонефтяных эмульсий;
- повышение эффективности применения жидкого топлива (нефть, мазут, дизельное) [1].

### **1.3 Задача проектирования**

Следовательно, преимущества оборудования и технологии ВСМА, приведённые выше, обусловленные наличием высоких удельных характеристик физических воздействий на обрабатываемую среду, могут устранить недостатки существующих устройств и методов, применяемых для разгрузки вязких нефтепродуктов из ж/д цистерн.

Необходимая производительность предлагаемых устройств ВСМА, задаваемая конкретными требованиями эксплуатации, может быть достигнута выполнением готового устройства, состоящего из нескольких модулей, каждый из которых обеспечивает свою равную долю производительности. Зная общие

требования по обеспечению производительности готового устройства и показатели производительности отдельного модуля, можно определить необходимое количество таких модулей, объединённых в единую конструкцию.

Существенным отличием устройств ВСМА является работа в режимах близких к резонансу. Такой режим работы устройств ВСМА обеспечивает максимальные удельные показатели по производительности обработки при минимальных затратах электроэнергии. Практические параметры обрабатываемых жидкостей, учитывая их изменяющийся компонентный состав, не являются постоянными. Тогда для обеспечения работы устройств ВСМА в режимах, близких к резонансу, необходимо предусматривать возможность регулирования частоты воздействий. Для электромагнитных устройств, каковым и являются устройства ВСМА, это реализуется использованием частотных преобразователей [10].

Таким образом, учитывая вышеизложенное, основные исходные данные настоящей работы по проектированию устройства ВСМА, предназначенного для разгрузки вязких жидкостей из ж/д цистерн можно свести к следующему:

1. Напряжение питания, В - 380, 50 Гц
2. Производительность обработки, м<sup>3</sup>/час, не менее - 15,0
3. Возможность частотного регулирования воздействий.
4. Устройство ВСМА является модульным.
5. Собственная частота колебаний, Гц - 70

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВИБРОАКТИВАТОРА ДЛЯ РАЗГРУЗКИ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ Ж/Д ЦИСТЕРН**

### **2.1 Расчет единичного рабочего модуля виброобработки**

Из опыта разработок устройств ВСМА следует, что наиболее целесообразным при разработки конструкции устройства для разгрузки вязких жидкостей из ж/д цистерн является модульный подход, позволяющий оптимально решить поставленные в работе задачи: обеспечить требуемую производительность при заданных габаритах. Дополнительно, решается задача обеспечения высокой работоспособности и надёжности.

Модуль виброобработки (МВО) является основной частью виброактиватора для разгрузки вязких жидкостей из ж/д цистерн и осуществляет непосредственное виброструйное магнитное воздействие на жидкую среду.

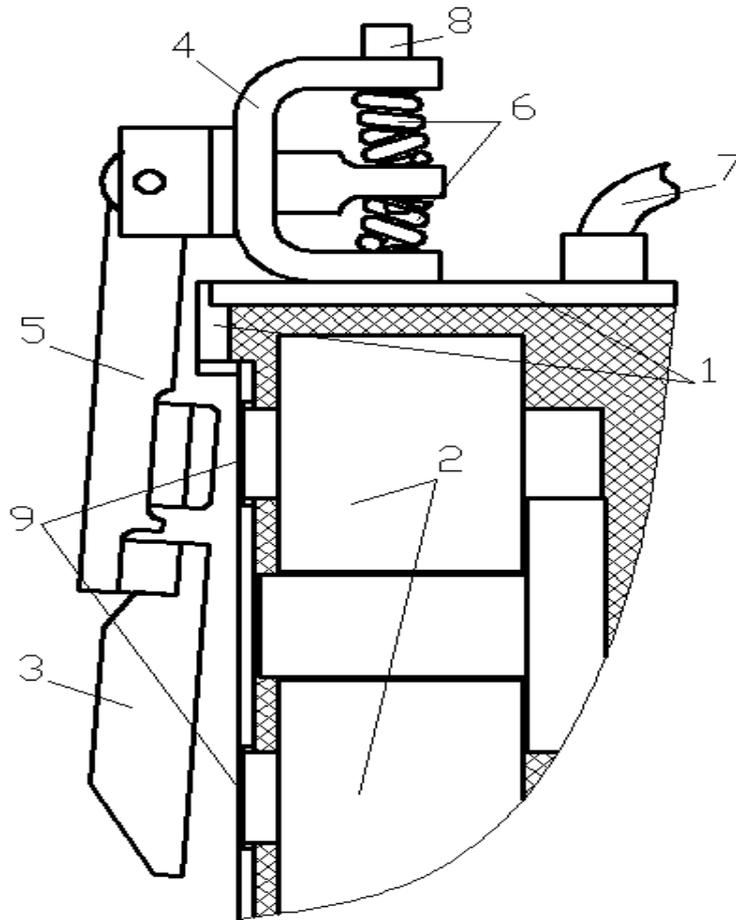


Рисунок 2.1.1 Конструкция модуля виброобработки

МВО состоит из:

- 1 – корпус;
- 2 – электромагнит;
- 3 – активатор;
- 4 – кронштейн;
- 5 – рычаг;
- 6 – пружина;
- 7 – устройство ввода;
- 8 – регулирующий винт;

9 – стенка МВО.

Корпус МВО 1 предназначен для размещения электромагнита 2 в объёме, изолированном от воздействия среды обработки и поэтому он должен быть герметичным. Пространство корпуса, не занятое электромагнитом, заливается компаундом, для обеспечения лучшего теплоотвода с обмоток и магнитопровода.

Электромагнит 2 предназначен для создания возмущающей силы в колебательной системе. Электромагнит жёстко связан с корпусом, поэтому в данной конструкции колебания совершает активатор 3, являющийся якорем электромагнита. Сердечник электромагнита выполнен из листов электротехнической стали 10 П-образной формы, набранных в пакет. На обоих стержнях сердечника расположены одинаковые катушки. Активатор выполнен из цельной заготовки. Активатор выполнен круглой формы. В теле активатора выполнено специальное трапециидальное отверстие для формирования затопленных струй. Активатор 3 закреплён на длинном плече рычага 5. Крепление подвижных элементов МВО к корпусу производится при помощи кронштейна 4.

Возвращающую силу колебательной системы МВО формируют упругости 6, представляющие из себя цилиндрические пружины.

Регулировочный винт 8 предназначен для регулировки начального зазора между активатором и стенкой корпуса МВО.

МВО, представляющий собой колебательную систему, работает в резонансном режиме, который позволяет при минимальных энергозатратах оказывать максимальное комплексное виброструйное магнитное воздействие на нефтепродукт, находящейся в цистерне. Объясняется это тем, что в резонансе амплитуда колебаний активатора является максимальной. Резонансный режим обеспечивается соответствующим отношением значений массы колеблющихся элементов и жёсткости пружин. Исходным значением для определения значения жёсткости пружин является масса активатора.

По условиям задания частота собственных колебаний для проектируемого устройства составляет 70 Гц. Масса активатора определяется из выбранных его геометрических размеров.

Определение массы активатора необходимо для проектирования и расчёта пружинного подвеса колебательной системы устройства ВСМА. Расчёт массы активатора носит предварительный характер и при его реализации можно сделать некоторые допущения, позволяющие упростить ход расчёта. Учитывая, что активатор выполнен из магнитопроводящей стали, плотность материала активатора равна  $\rho=7\ 800\ \text{кг/м}^3$ . Объём активатора, занимаемый стальной частью, можно представить как совокупность частей, имеющих цилиндрические и конусные формы. Упрощённая схема составных частей активатора, представленного на рис.2.1.2 может быть представлена следующим образом:

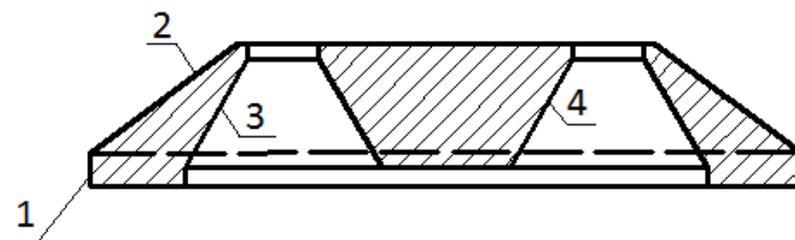


Рис. 2.1.2 К определению массы активатора

где:

- 1 – цилиндр основания активатора
- 2 – усечённый конус, образованный наружной формой активатора
- 3 – усечённый конус, образованный внешней образующей полости внутри активатора
- 4 – усечённый конус, образованный внутренней образующей полости внутри активатора

Тогда для определения объёма материала активатора можно поступить следующим образом:

$$V_{\text{общ}} = V1 + V2 - V3 + V4, \quad (2.1.1)$$

где:

V1 - объём цилиндра основания активатора;

V2 - объём усечённого конуса, образованного наружной формой активатора;

V3 - объём усечённый конус, образованного внешней образующей полости внутри активатора;

V4 - объём усечённый конус, образованного внутренней образующей полости внутри активатора.

Объёмы указанных частей активатора рассчитываются следующим образом:

цилиндрическая часть

$$V1 = \pi H R_{\text{осн.акт.}}^2, \quad (2.1.2)$$

где:

$R_{\text{осн. акт.}}$  – радиус основания активатора.

$$V1 = 3,14 * 6 * 55^2 = 56991 \text{ мм}^3$$

конусные части

$$V2(3,4) = \frac{1}{3} \pi H (R_{\text{осн.1}}^2 + R_{\text{осн.1}} * R_{\text{осн.2}} + R_{\text{осн.2}}^2), \quad (2.1.3)$$

где:

$R_{\text{осн.1}}$  – радиус нижнего основания усечённого конуса

$R_{\text{осн.2}}$  – радиус верхнего основания усечённого конуса

$$V2 = \frac{1}{3} * 3,14 * 19 * (55^2 + 55 * 28 + 28^2) = 106374 \text{ мм}^3,$$

$$V3 = \frac{1}{3} * 3,14 * 25 * (38^2 + 38 * 27 + 27^2) = 83707 \text{ мм}^3,$$

$$V4 = \frac{1}{3} * 3,14 * 23 * (17^2 + 17 * 6 + 6^2) = 10279 \text{ мм}^3,$$

$$V_{\text{общ}} = 56991 + 106374 - 83707 + 10279 = 89937 \text{ мм}^3 ;$$

$$m = \rho * V_{\text{общ}} = 7800 * 0,000089937 = 0,702 \text{ кг} \quad (2.1.4)$$

Объём материала активатора, рассчитанный по приведённым формулам, составляет 89,9 см<sup>3</sup>, а расчётная масса активатора составляет 0,702 кг.

Для приведённых значений жёсткость рассчитывается

$$q = \omega_0^2 * m, \quad (2.1.5)$$

где:  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$  – угловая частота собственных колебаний;

механической части ЭМП;

$m$  – масса подвижных элементов ЭМП (активатора);

$$\omega_0 = 2 * 3,14 * 66 = 414,5 \text{ Гц};$$

$$q = 414,5^2 * 0,702 = 120600 \text{ Н/м} ,$$

По известным методикам [17] рассчитываем основные размеры пружины с жёсткостью не менее  $C = 120,6 \text{ Н/мм}$ . На рисунке 2.1.3 представлен чертеж пружины.

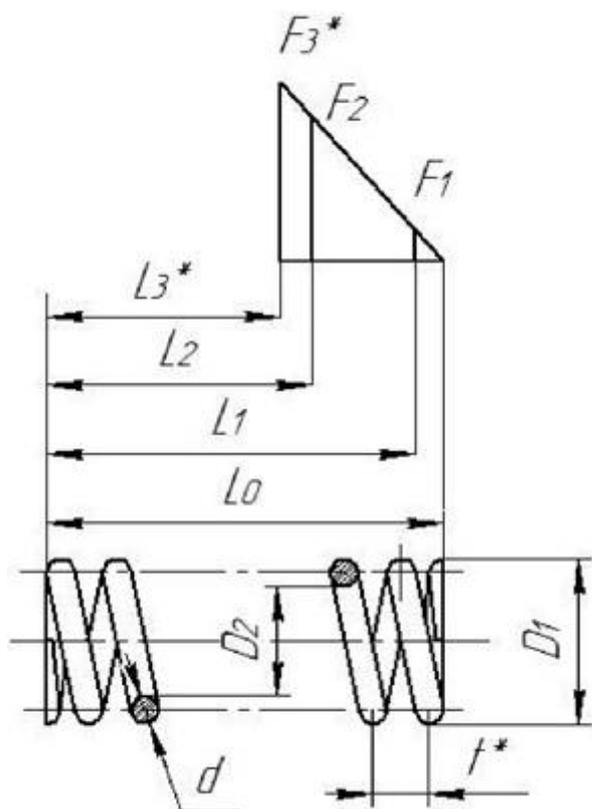


Рисунок 2.1.3 Чертеж пружины.

В ходе выбора пружины, получили параметры, представленные в таблице 2.1.[2]

Таблица 2.1.1 – параметры пружины

Материал	Проволока по ГОСТ 9389
Диаметр проволоки (прутка) $d$	4.6 мм
Наружный диаметр $D1$	25 мм
Длина пружины без нагрузки $L0$	30 мм
Рабочее число витков $n$	4
Контрольная (предварительная) длина $L1$	28 мм
Контрольная (рабочая) длина $L2$	3 мм
Внутренний диаметр $D2$	15.8 мм
Полное число витков $n1$	6
Длина при соприкосновении витков $L3$	25.3 мм
Предварительная нагрузка $F1$	259 Н
Рабочая нагрузка $F2$	3492 Н

Максимальная нагрузка F3	607 Н
Жёсткость пружины c	129 Н/мм
Шаг t	5.8 мм
Ход пружины при предварительном сжатии S1	2 мм
Максимальный рабочий ход пружины S2	27 мм
Ход пружины до соприкосновения витков S3	4.7 мм
Масса пружины m	0.051 кг

Принцип комплексного физического воздействия технологии ВСМА заключается в следующем: при подаче напряжения на МВО по обмоткам магнитопровода протекает ток, создающий электромагнитную силу притяжения активатора к полюсам стержней магитопровода. Активатор при этом движется в сторону стенки МВО. Жидкость, находящаяся в пространстве между основанием активатора и стенкой МВО выдавливается через отверстие в активаторе, образуя пульсирующую затопленную струю жидкости. При этом пружина сжимается, запасая кинетическую энергию. При снятии напряжения с обмоток электромагнитная сила притяжения становится равной нулю и за счёт кинетической энергии, запасённой в пружине, активатор начинает двигаться в обратном направлении - от стенки МВО. При питании обмоток напряжением переменной частоты и использовании диода активатор совершает гармонические колебания, частотой, равной частоте питающего напряжения.

Учитывая, что при работе ЭМП в различных жидкостях сопротивление движению активатора будет изменяться, возникает необходимость регулировать частоту питающего напряжения, для обеспечения резонансного режима. Регулирование частоты питающего напряжения можно осуществлять с помощью преобразователя частоты.

Важным моментом при настройке работы МВО является обеспечение колебаний активатора в пределах выставленного начального зазора между активатором и корпусом МВО. Электромагнитная сила притяжения активатора к полюсам электромагнита должна быть достаточной для создания колебаний с

необходимой амплитудой. При недостаточной амплитуде колебаний активатора количество жидкости, образующей поток, не будет соответствовать максимально возможной. При амплитуде колебаний активатора больше, чем выставленный начальный зазор, активатор будет стучать по стенке МВО, что может привести к её разрушению и нарушению герметичности корпуса.

Имеющиеся технологическая оснастка, которая была изготовлена при производстве промышленного образца вибратора типа ВЭМА-0,3, позволяет её использовать и для разработки МВО устройства для разгрузки вязких жидкостей из ж/д цистерн [1].

Расчётные параметры МВО имеют конструктивные размеры, приведенные на рисунке 2.4 и в таблице 2.1.

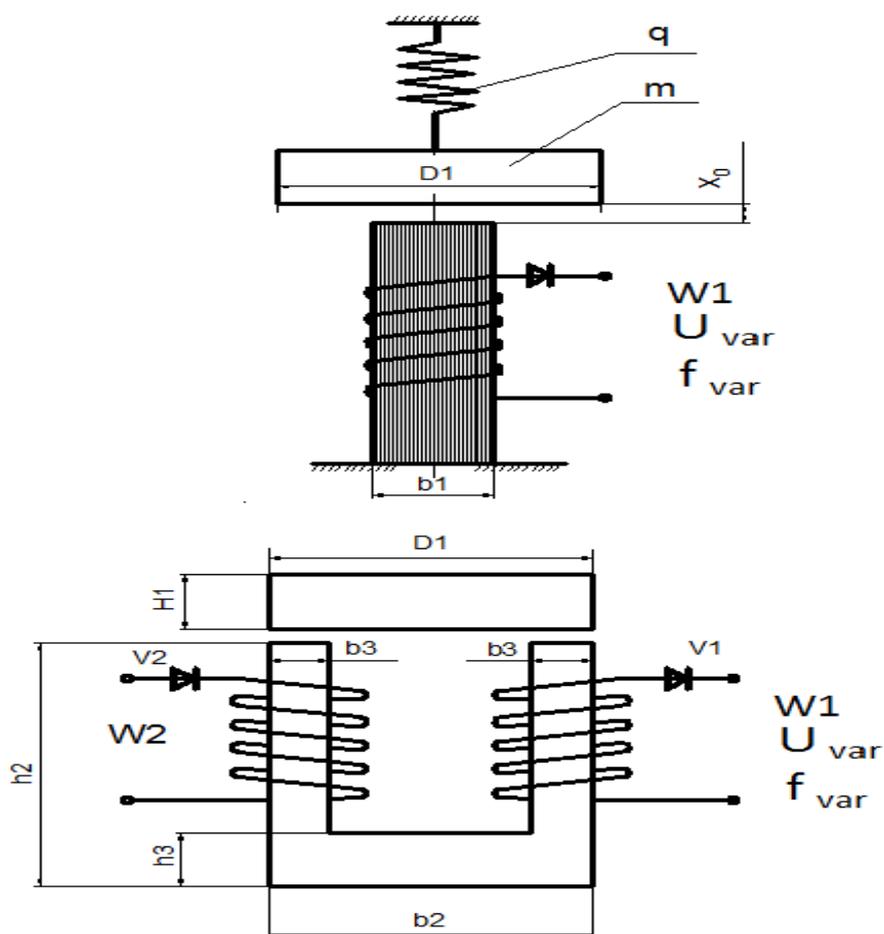


Рисунок 2.1.4 Расчётная схема МВО

Электромагнит жёстко связан с корпусом устройства, поэтому в данной конструкции колебания совершает активатор, являющийся якорем электромагнита, геометрические параметры якоря, а также активатора идентичны, поэтому указываем в таблице 2.2 параметры для одного элемента МВО.

Таблица 2.1.2– Основные размеры МВО

Параметр	Обозначение	Величина
Диаметр активатора, м	$D_1$	0,110
Высота (толщина) активатора, м	$H_1$	0,025
Высота стержня индуктора магнитопровода, м	$H_2$	0,080
Длина спинки индуктора магнитопровода, м	$B_2$	0,107
Ширина индуктора магнитопровода (полюса), м	$B_1$	0,036
Ширина стержня индуктора (полюса), м	$B_3$	0,018
Толщина спинки индуктора магнитопровода, м	$H_3$	0,02
Величина начального воздушного зазора, м	$X_0$	0,004
Частота собственных колебаний системы, Гц	$f_0$	70
Резонансная частота в жидкости, Гц	$f_{рж}$	58

## 2.2 Определение обмоточных данных катушек электромагнитного привода

Обмоточные данные МВО: количество витков в обмотке и диаметр обмоточного провода, рассчитываются, исходя из определённых выше размеров магнитопровода. Обмотка размещается в окне магнитопровода. Полное сечение окна магнитопровода равно:

$$S_{\text{окна}} = (B_2 - 2 \cdot B_3) \cdot (H_2 - H_3) = (0.107 - 2 \cdot 0.018) \cdot (0.080 - 0.02) = 0.00426 \text{ м}^2. \quad (2.2.1)$$

По справочным данным выбираем обмоточный провод с диаметром 1.04 мм. Исходя из площади окна магнитопровода и диаметра обмоточного провода, можно подсчитать какое количество витков обмотки можно разместить в окне магнитопровода:

$$N_0 = \frac{S_{\text{окна}}}{\pi \cdot R^2} \cdot k_3 = \frac{0.00426}{3,14 \cdot 0,00052^2} \cdot 0.6 = 3010, \quad (2.2.2)$$

где  $N_0$  – количество витков обмотки;

$R$  – радиус обмоточного провода, м;

$k_3$  – коэффициент заполнения, 0,6-0,7.

Из технологических соображений рекомендуется выполнять две обмотки, тогда количество витков одной обмотки будет равно  $N=1505$ .

Произведём расчет активного сопротивления катушек.

Находится средняя длина одного витка:

$$l_{\text{ср}} = \frac{2(B_1+B_3+4 \cdot B) + 2(B_1+B_3)}{2}, \quad (2.2.3)$$

где:

$B$  является толщиной катушки.

$$B = \frac{B_2 - 2 \cdot B_3 - 0,002}{2} = \frac{0,107 - 2 \cdot 0,018 - 0,002}{2} = 0,035 \text{ м} \quad (2.2.4)$$

$$l_{\text{ср}} = \frac{2(0,036 + 0,018 + 4 \cdot 0,035) + 2(0,036 + 0,018)}{2} = 0,248 \text{ м}.$$

Находим сопротивление катушки:

$$R_{\text{к}} = \rho \frac{l_{\text{ср}} \cdot N}{S}, \text{ где} \quad (2.2.5)$$

$\rho$  – удельное сопротивление меди,  $\rho = 0.0175 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;

$S$  – площадь сечения обмоточного провода,  $S = 0.71 \text{ мм}^2$ .

$$R_{\text{к}} = 0.0175 \frac{0.248 \cdot 1505}{0.71} = 9.2 \text{ Ом}.$$

### 2.3 Производительность активации (обработки) МВО

Объём пространства активации жидкости определяется размерами и амплитудой колебаний активатора, что поясняется рисунком 2.3.1. При каждом движении активатора по направлению к стенке электромагнитного преобразователя (ЭМП) объём жидкости, находящейся в пространстве активации **12345678**, проходит через специальные отверстия в активаторе, образуя затопленные струи. Затопленные струи образуются за счёт различия значений гидравлического сопротивления при движении активатора в прямом и обратном направлениях, обусловленного трапециидальной формой щели в активаторе.

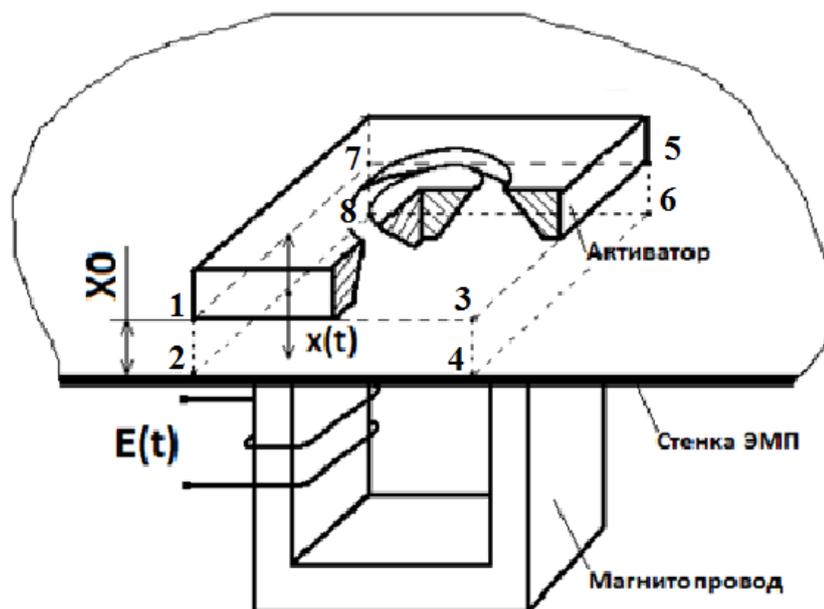


Рисунок 2.3.1 Принцип активации жидкости резонансным ЭМП

Порцию жидкости, проходящую обработку за один цикл, на одном МВО  $Q$ , формирующуюся затопленными струями и проходящую через щель в активаторе, можно определить как

$$Q = S_{\text{захв}} \cdot x_0 \cdot f, \quad (2.3.1)$$

где:

$S_{захв}$  - площадь захвата, являющаяся частью площади основания активатора;

$x_0$  – зазор между активатором и стенкой ЭМП;

$f$  - частота колебаний активатора.

$S_{захв}$  - площадь захвата рассчитывается по формуле

$$S_{захв} = k \cdot S_{осн} , \quad (2.3.2)$$

где:

$S_{осн}$  – площадь основания активатора ;

$k$  – коэффициент захвата.

Коэффициент  $k$  учитывает то обстоятельство, что не вся жидкость, находящаяся в объёме пространства активации, участвует в образовании затопленных струй. Часть жидкости, находящаяся по периферии основания активатора при движении активатора к стенке ЭМП будет двигаться в обратном направлении потока жидкости, поэтому коэффициент  $k$  меньше единицы и определяется отношением площади основания конуса, формирующего сопло активатора, к площади основания активатора. Для активатора круглой формы можно принять  $k=1,0$ .

Выполнение оборудования ВСМА с числом активаторов  $N$ , что решается конструктивно достаточно просто, приводит к увеличению суммарного объёма, проходящего через щели в  $N$  активаторах. Тогда общий расход жидкости  $Q_N$  виброактиватора будет определяться как:

$$Q_N = Q \cdot N , \quad (2.3.3)$$

Установлено, что процесс образования затопленных струй усиливается за счёт создания нарастающего избыточного давления в зоне активации по мере приближения активатора к стенке МВО. Результаты экспериментов позволили вывести закономерность между суммарным объёмом прокачки жидкости  $N$  активаторами и их амплитудами колебания:

$$Q_{Nx} = Q_N \cdot \left(\frac{x}{X_0}\right)^2, \quad (2.3.4)$$

где:  $x$  – амплитуда колебаний активатора;

$X_0$  – начальный зазор между активатором и корпусом МВО.

Амплитуда колебаний активатора, которую можно определить из общего уравнения движения МВО, зависит от возмущающей силы и механического сопротивления движению активатора.

Механическое сопротивление при колебаниях активатора в жидкости не является величиной постоянной, а зависит от скорости колебаний активатора. Чем выше скорость колебаний активатора, тем выше вероятность появления турбулентности, сопровождаемой возрастанием механического сопротивления движению активатора. Значение механического сопротивления колебаниям активатора в жидкости при ламинарном процессе обозначим  $R_{m0}$ . Для вязких нефтепродуктов  $R_{m0}$  соответствует сопротивлению установившегося разжиженного состояния, значения которого для исследованных нефтепродуктов изменяется от 80 кг/с и выше.

Определённое влияние на турбулентность течения жидкости вблизи колеблющегося активатора имеет форма его основания. Указанное обстоятельство ведёт к увеличению значения  $R_{m0}$ , которое можно учесть коэффициентом формы активатора  $\lambda_\phi$ . Наименьшее значение  $\lambda_\phi=1,3$ , как было установлено в результате экспериментов, соответствует активатору круглой формы.

Отмеченные закономерности изменений сопротивления представим в виде:

$$R_m(v) = R_{m0} \cdot \lambda_\phi \cdot e^{\frac{v}{\bar{v}}}, \quad (2.3.6)$$

где:  $v$  – скорость колебаний активатора в жидкости;

$R_{m0}$  – сопротивление движению активатора при ламинарном процессе;

$\lambda_\phi$  – коэффициент формы;

$V$  – скорость активатора, при которой проявляется влияние турбулентности.

Площадь захвата для круглой формы  $S_{захв}$  рассчитывается по формуле:

$$S_{захв} = k \cdot S_{осн} = 1 * 0.0096 = 0.0096, \quad (2.3.7)$$

где:  $S_{осн} = \pi \cdot r^2 = 3.14 * 0,055^2 = 0.0096$ - площадь основания формы активатора,

$r = 0.055$ м - радиус активатора.

Расход жидкости, формирующийся затопленными струями активаторов  $Q_{Nx}$  с размерностью м<sup>3</sup>/ч, в этом случае при максимальной амплитуде колебаний и начальном зазоре между стенкой и активатором  $X_0 = 4$  мм (предварительно задаётся в задании) можно определить как

$$Q = X \cdot \left(\frac{x}{X_0}\right)^2 \cdot S_{захв} \cdot f \cdot 3600 = 0,004 * \left(\frac{0,004}{0,004}\right)^2 * 0.0096 * 58 * 3600 = 8.2, \text{ м}^3/\text{час} \quad (2.3.8)$$

Производительность активации (обработки) различных жидкостей по данным многочисленных исследований зависит от количества циклов обработки порций жидкости, находящихся в зоне активации. Таких циклов должно быть не менее 10. В таком случае производительность виброактиватора будет определяться выражением:

$$S_{акт} = \frac{Q_{Nx}}{10}, \quad (2.3.9)$$

$$S_{акт} = \frac{8.2}{10} = 0.82,$$

По данному значению производительности активации, учитывая требование обеспечения производительности всего устройства не менее 15 м<sup>3</sup>/час, можно определить необходимое количество МВО.

$$N = Q/Q_n , \quad (2.3.10)$$

$$N = 15/0.82=18,$$

Расчёты показывают, что для обеспечения заданной в работе производительности устройства для разгрузки высоковязких жидкостей из ж/д цистерн необходимо использовать не менее 18 МВО.

#### **2.4 Разработка конструкции виброактиватора для разгрузки вязких нефтепродуктов из ж/д цистерн**

Следуя логике принятия технических решений, закономерным при разработке устройства для разгрузки вязких нефтепродуктов из ж/д цистерн, состоящего из не менее чем 18 МВО, является выбор конструкции, которая может быть помещена внутри цистерны через люк-лаз.

Размеры технологического люка ж/д цистерн регламентируются и устанавливаются исходя из возможности проникновения внутрь цистерны человека для проведения определённых технологических операций. Диаметр люка как правило устанавливается в пределах не менее 500 мм. Следовательно, внешний диаметр проектируемого устройства не должен превышать 500 мм.

Размеры одного МВО и вышеуказанные обстоятельства позволяют выполнить конструкцию устройства виброактиватора в варианте многоблочного исполнения, когда в одном блоке размещаются шесть МВО. Конструкция виброактиватора иллюстрируется на рисунках 2.4.1 а), 2.4.1 б) и состоит из 18 МВО. Сборочный чертеж МВО представлен в приложение В.

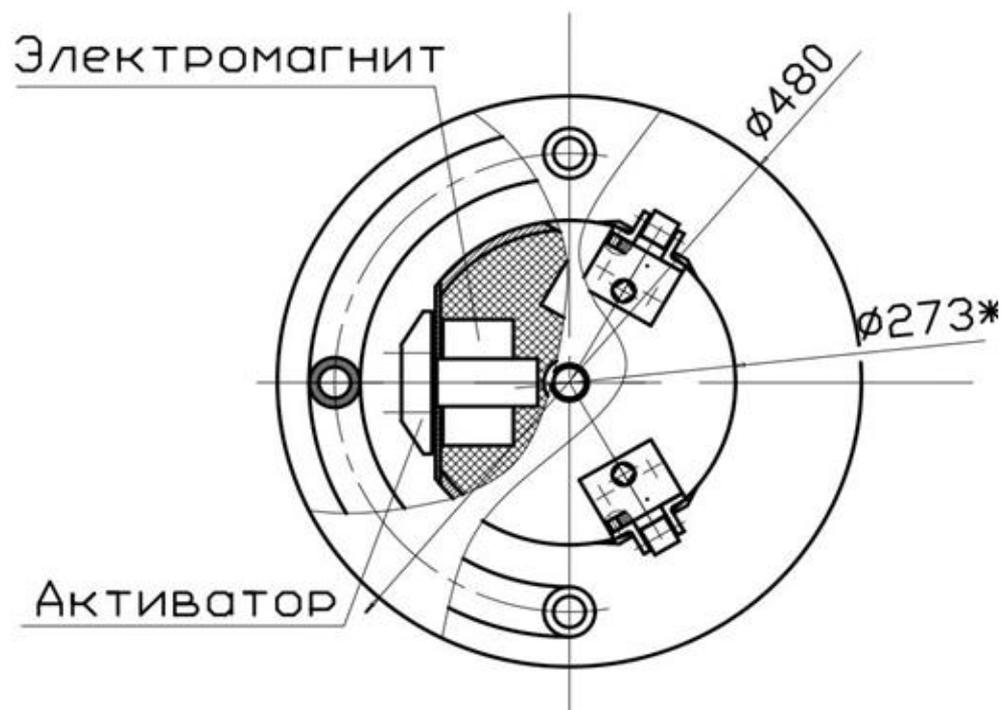


Рисунок 2.4.1 а) - Конструкция виброактиватора. Вид сверху.

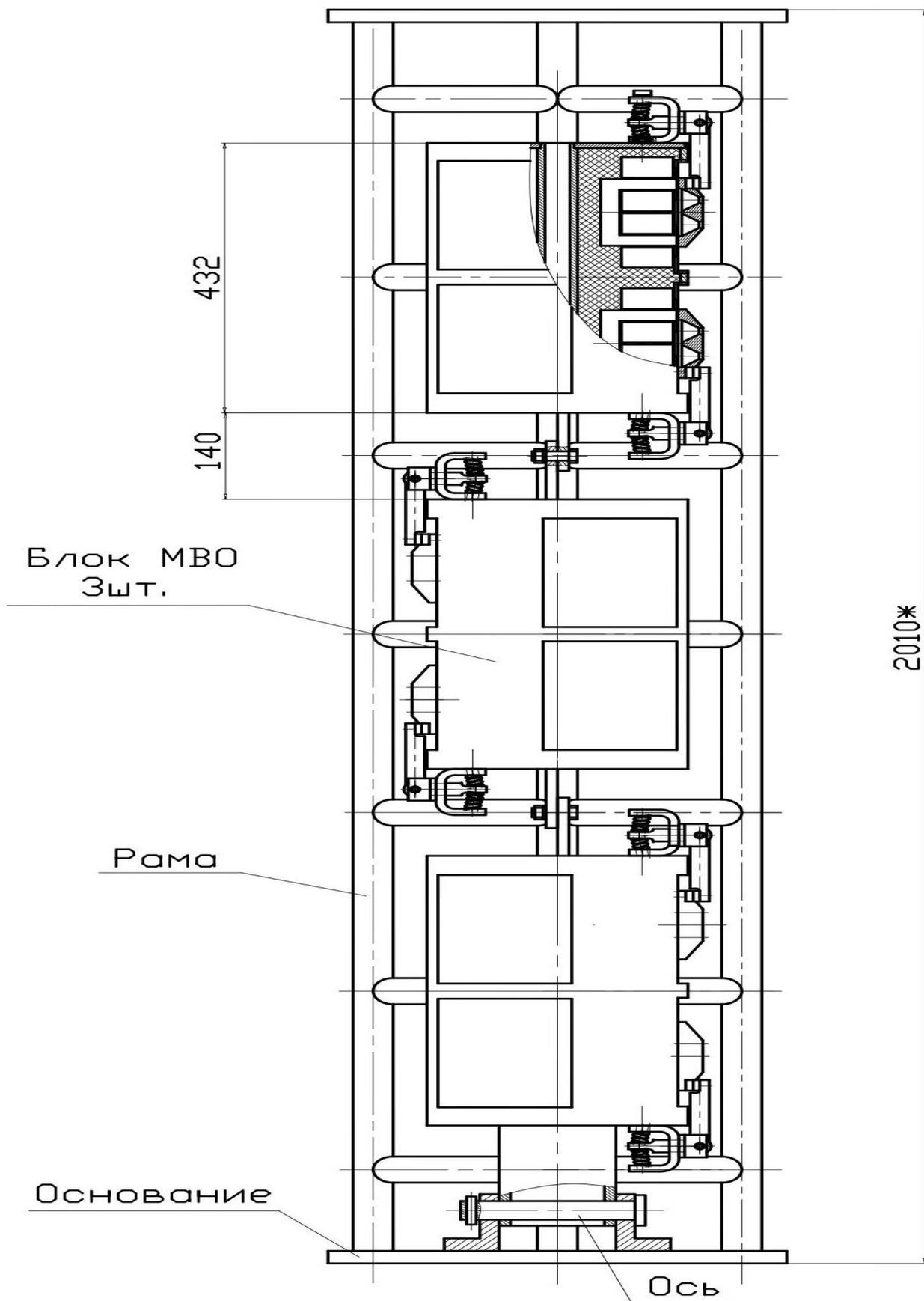


Рисунок 2.4.1 б) – Общий вид конструкции виброактиватора

Основные части виброактиватора:

- МВО;
- Блоки МВО;
- Рама;
- Ось;
- Основание;

Виброактиватор состоит из трех блоков, в каждом из которых расположено по 6 модулей виброобработки. Благодаря рамной конструкции, через ось соединяющейся с виброактиватором, возможно расширение зоны обработки посредством перемещения виброактиватора внутри цистерны как показано на рисунках 2.4.2 а), 2.4.2 б) и 2.4.2 в).

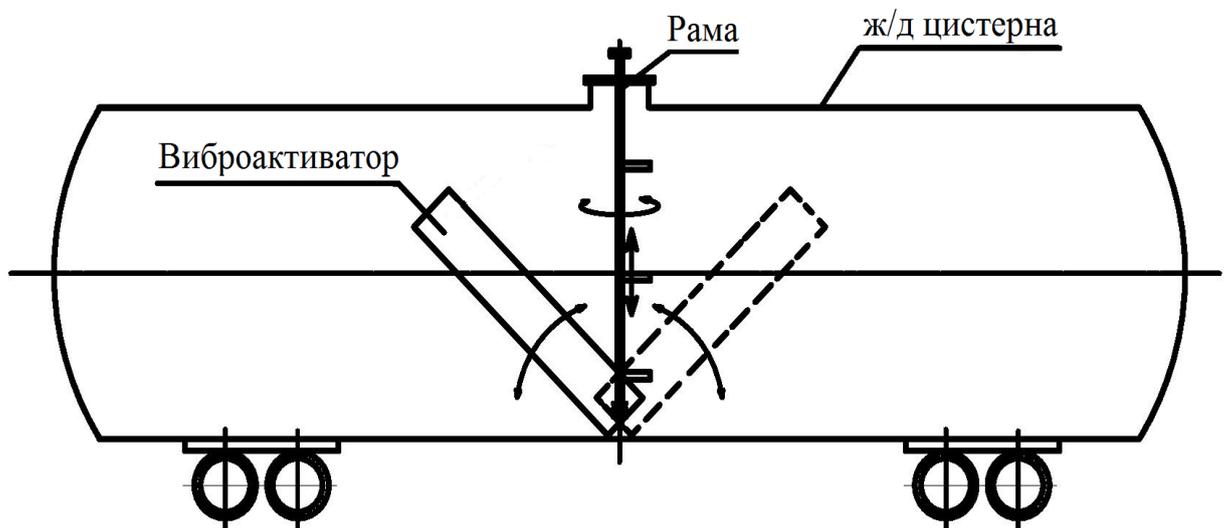


Рисунок 2.4.2 а) – Возможности перемещения виброактиватора внутри цистерны

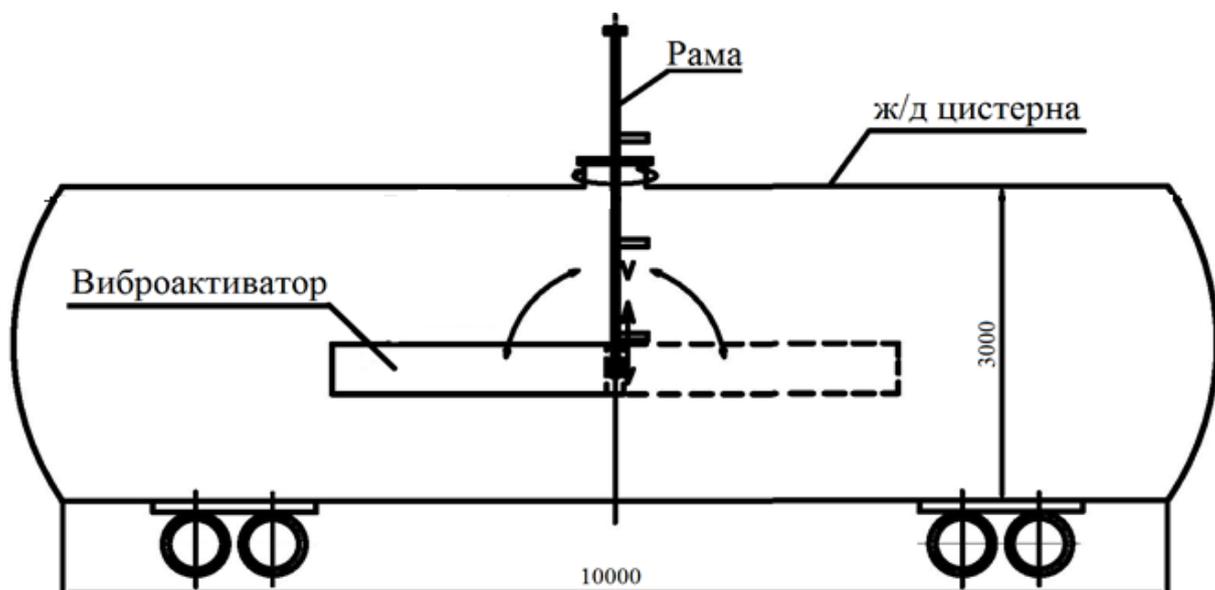


Рисунок 2.4.2 б) – Возможности перемещения виброактиватора внутри цистерны

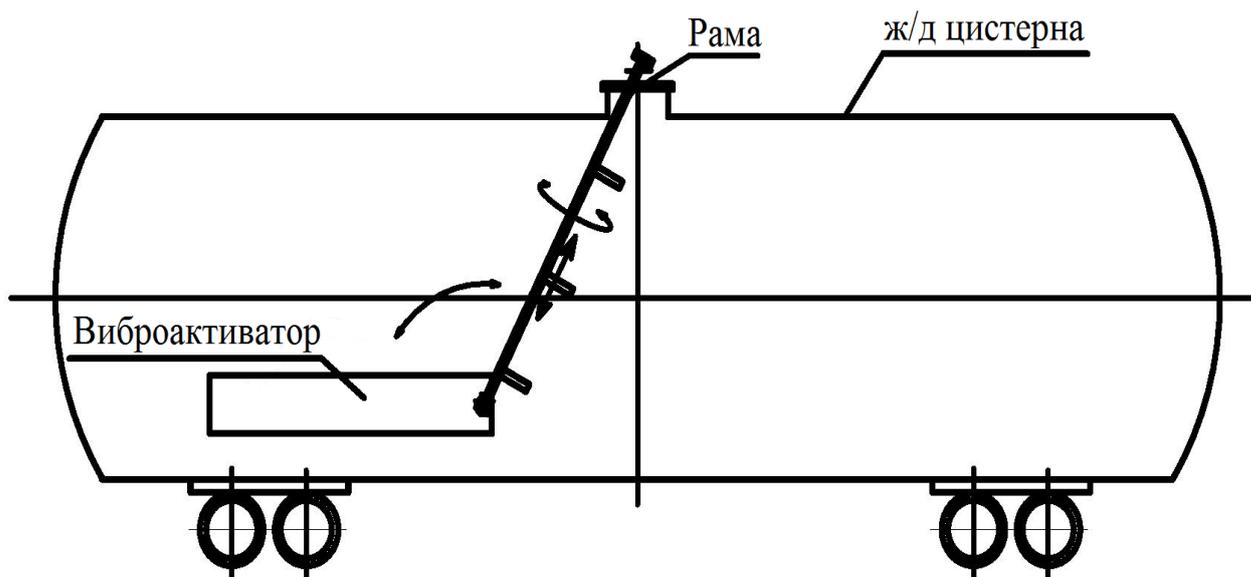


Рисунок 2.4.2 в) – Возможности перемещения виброактиватора внутри цистерны

## 2.5 Разработка схемы подключение виброактиватора

Промышленная энергосистема позволяет осуществить подключение виброактиватора как на однофазную сеть, так и на трехфазную. Трехфазная

схема питания обеспечивает равномерную нагрузку во всех трех фазах, устраняя перекося нагрузки фаз.

Таким образом, учитывая наличие восемнадцати МВО, подключаем устройство по схеме электропитания с использованием трёхфазной системы, что даёт равномерную нагрузку на промышленную сеть. Трёхфазная схема питания виброактиватора иллюстрируется на рисунке 2.5.1.

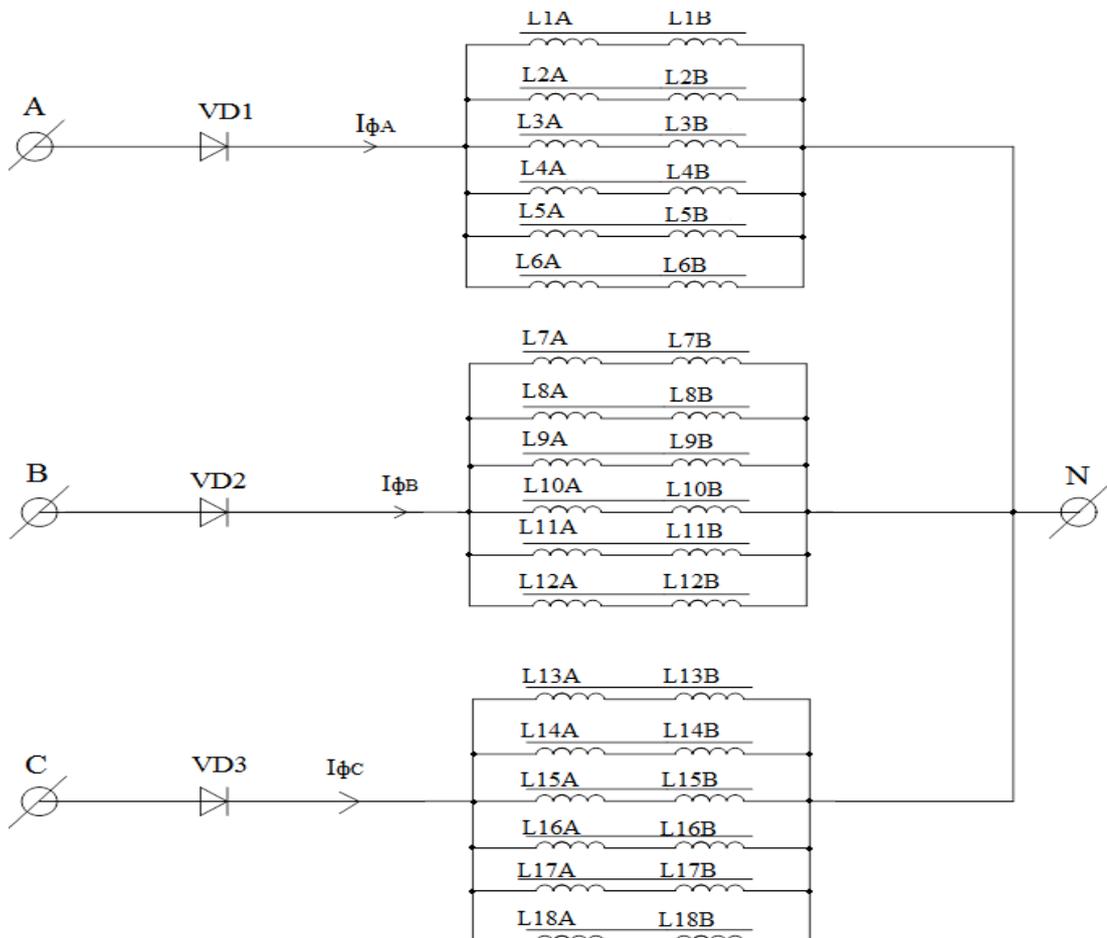


Рисунок 2.5.1 – Трёхфазная фазная схема подключения виброактиватора.

- **VD1-VD3** – диоды;
- **L1A – L18A, L1B – L18B** – катушки индуктивности МВО.

Фазные токи БВО будут равны фазным токам  $I_{\phi 1}$ ,  $I_{\phi 2}$  и  $I_{\phi 3}$ .

Полный ток фазы, **A**:

$$I_{\phi A} = I_{\max} \cdot n, \quad (2.5.1)$$

Полный ток фазы, **B**:

$$I_{\phi B} = I_{\max} \cdot n, \quad (2.5.2)$$

Полный ток фазы, С:

$$I_{\phi C} = I_{\max} \cdot n, \quad (2.5.3)$$

где:  $n$  - количество МВО в одном блоке устройства.

## ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ

### 3.1 Схема замещения электрических контуров установки

Электрическая схема представляет собой основной и два короткозамкнутых (КЗ) контура. Основной электрический контур представляет собой электромагнит, включающий индуктивности катушек  $L1$  и  $L2$ , активные сопротивления катушек  $R1$  и  $R2$ , и диод  $VD$ . Энергия распространения колебаний в пространстве, как известно, зависит от частоты возмущений. Причём, чем выше частота, тем меньше радиус распространения энергии колебаний в среде. Использование диода  $VD$  позволило обеспечить частоту возмущающей силы 50 Гц при частоте питающего напряжения 50 Гц.

Короткозамкнутые контуры, создаваемые конструктивными элементами стенки корпуса МВО, отделяющей активаторы и электромагниты, на схеме замещения представлены индуктивностью  $L_{кз}$  и активными сопротивлениями  $R_{кз}$ .

Так как КЗ контуры идентичны друг другу, в дальнейшем при составлении уравнений будем учитывать в схемах замещения только один КЗ контур. Расчетная схема замещения электрической части МВО представлена на рисунке 3.1.

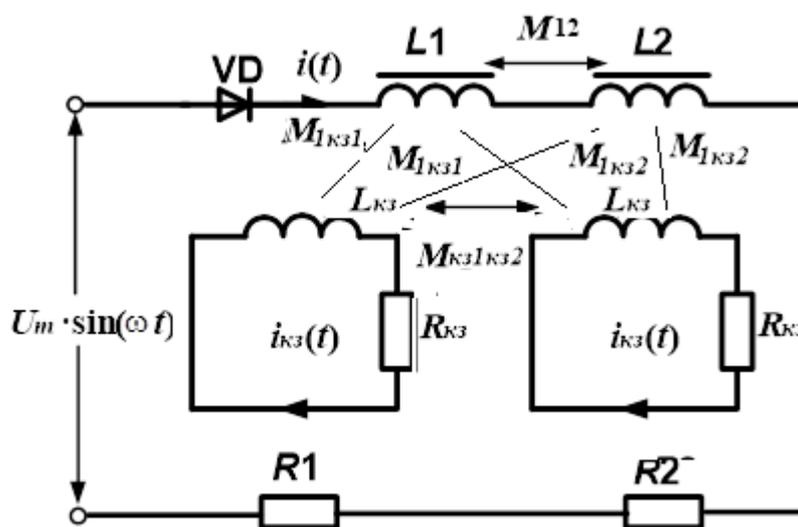


Рисунок 3.1.1 – Схема замещения электрической части установки

Рисунок 3.1.1- включает в себя следующие элементы

- $L_1, L_2$  – индуктивности основных катушек;
- $R_1, R_2$  – активные сопротивления основных катушек;
- $M_{12}$  – взаимная индуктивность между катушками;
- $L_{кз}, R_{кз}$  – индуктивность и активное сопротивление короткозамкнутого контура соответственно;

$M_{кз}$  – взаимная индуктивность короткозамкнутого контура катушки.

Определим параметры электрических контуров системы МВО.

Активные сопротивления катушек определены ранее:

$$R_1 = R_2 = R_k = 9,2 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление КЗ контура принимаем:

$$R_{кз} = \rho_{кз} \cdot \frac{l_{кз}}{S_{кз}} = 0.0002 \text{ Ом,} \quad (3.1.1)$$

где:

$\rho_{кз} = 0.047 \text{ Ом}^{-1}$  – проводимость короткозамкнутого витка,

$l_{кз} = 0.1 \text{ м}$  – длина короткозамкнутого витка,

$S_{кз} = 20 \text{ мм}^2$  - сечение короткозамкнутого витка.

Индуктивности основных катушек:

$$\begin{aligned} L_1 = L_2 = L_k &= k \cdot \frac{\mu_{ст.10} \cdot \mu_0 \cdot S \cdot N^2}{l + \delta_\Sigma \cdot \frac{\mu_{ст.10}}{\sigma}} = \\ &= 1 \cdot \frac{5000 \cdot 1,26 \cdot 10^{-7} \cdot 648 \cdot 10^{-6} \cdot 1505^2}{0,32 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8000}{1,5}} = 0.05482 \text{ Гн,} \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

где:

$N=1505$  – число витков основной катушки;

$l = 0,23 \text{ м}$  - длина средней линии магнитопровода;

$S = 36 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 648 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  – площадь поперечного сечения сердечника;

$\delta_{\Sigma} = x_0 + 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} + 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – величина суммарного воздушного зазора;

$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\mu_{\text{ст.10}} \approx 5000$  – относительная магнитная проницаемость стали 10;

$\sigma = 1,5$  – коэффициент рассеивания;

$k=1$  – коэффициент, учитывающий отношение высоты катушки к расчётному диаметру катушки ( $l/d \gg 10$ ).

Индуктивность КЗ контура:

$$L_{\text{кз}} = \frac{\mu_{\text{ст}} \cdot \mu_0 \cdot S}{l} = 0.00028 \text{ Гн} \quad (3.1.3)$$

Принимаем следующие значения взаимных индуктивностей:

$$M_{12} = \frac{N^2 \cdot \mu_{\text{ст}} \cdot \mu_0 \cdot S}{(\delta_{\Sigma} - x_0) \cdot \mu_{\text{ст}} + l} = 0.0274 \text{ Гн} \quad (3.1.4)$$

$$M_{\text{кз}} = \frac{N \cdot \mu_{\text{ст}} \cdot \mu_0 \cdot S}{(\delta_{\Sigma} - x_0) \cdot \mu_{\text{ст}} + \frac{l}{0.5}} = 5.48 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}. \quad (3.1.5)$$

### 3.2 Электрическая схема замещения механического контура

Схема замещения механического контура приведена на Рис. 3.2.1

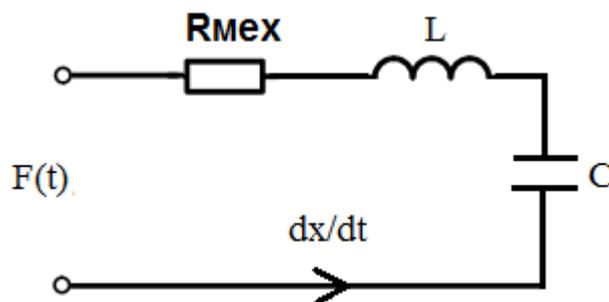


Рисунок 3.2.1 – Электрическая схема замещения механического контура

Дифференциальное уравнение, описывающее колебания, для механической части МВО при линейных перемещениях якоря:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + R \cdot \frac{dx}{dt} + q \cdot x = F(t) \quad (3.2.1)$$

где:

$m$  – колебательная масса;

$R$  – коэффициент демпфирования (механическое сопротивление);

$q$  – жесткость пружины;

$F(t)$  – возмущающая сила.

По аналогии с электрическими цепями  $L$  соответствует  $m$ ,  $C$  –  $q$ ,  $F(t)$  –  $U(t)$ .

### 3.3 Система уравнений, описывающих работу МВО

Система уравнений, описывающих работу МВО, приведенная ниже состоит из уравнений электрических контуров МВО и уравнения механического контура. Данные уравнения должны быть преобразованы в удобный вид для их решения численными методами.

#### Уравнения электрических контуров

Уравнение для основного электрического контура имеют вид

$$U_m \sin \omega t = i_k + R_k + \frac{d\Psi_\Sigma}{dt}, \quad (3.3.1)$$

где:  $\Psi_\Sigma$  – суммарное потокосцепление катушек  $L1, L2$

$i_k$  – ток, протекающий в основном контуре;

$U_m$  – амплитуда напряжения питания;

$R_k$  – активное сопротивление основного контура.

$\Psi_\Sigma$  – суммарное потокосцепление имеет вид:

$$\Psi_\Sigma = \Psi_1 + \Psi_2,$$

$\Psi_1$  - суммарное потокосцепление катушки  $L1$ , представляющее собой сумму потокосцеплений данной катушки, определяемую собственной индуктивностью и всеми возможными взаимоиндуктивными связями.

$\Psi_2$  - суммарное потокосцепление катушки  $L2$ , представляющее собой сумму потокосцеплений данной катушки, определяемую собственной индуктивностью и всеми возможными взаимоиндуктивными связями.

$\Psi_1$  суммарное потокосцепление катушки  $L1$  определяется как:

$$\Psi_1 = \Psi_{\text{соб.инд}1} + \Psi_{\text{в.инд}1} + \Psi_{\text{в.инд.К1}}, \quad (3.3.2)$$

где:

$$\Psi_{\text{соб.инд}1} = i_k \cdot L_1, \text{ - собственное потокосцепление катушки } L1;$$

$$\Psi_{\text{в.инд}1} = i_k \cdot M_{12}, \text{ - потокосцепление катушки } L1 \text{ с катушкой } L_2;$$

$$\Psi_{\text{в.инд.К}} = i_{k3} \cdot M_{1k31} \text{ - потокосцепление катушки с короткозамкнутым}$$

контуром;

$\Psi_2$  - суммарное потокосцепление катушки  $L2$  определяется как:

$$\Psi_2 = \Psi_{\text{соб.инд}2} + \Psi_{\text{в.инд}2} + \Psi_{\text{в.инд.К2}}, \quad (3.3.3)$$

где:

$$\Psi_{\text{соб.инд}2} = i_k \cdot L_2, \text{ - собственное потокосцепление катушки } L2;$$

$$\Psi_{\text{в.инд}1} = i_k \cdot M_{12}, \text{ - взаимное потокосцепление катушки } L_1, L_2;$$

$$\Psi_{\text{в.инд.К}} = i_{k3} \cdot M_{1k32}, \text{ - взаимное потокосцепление катушки с}$$

краткозамкнутым контуром;

Перепишем уравнение 3.3.1

$$U_m \sin \omega t = i_k + R_k + \frac{d\Psi_1}{dt} + \frac{d\Psi_2}{dt},$$

где: потокосцепление  $\Psi_1, \Psi_2$  будут равны:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{\Psi_{\text{соб.инд1}}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд1}}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд.K1}}}{dt} = \frac{i_{\kappa} \cdot L_1}{dt} + \frac{i_{\kappa} \cdot M_{12}}{dt} + \frac{i_{\kappa} \cdot M_{1\kappa31}}{dt},$$

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = \frac{\Psi_{\text{соб.инд2}}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд2}}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд.K2}}}{dt} = \frac{i_{\kappa} \cdot L_2}{dt} + \frac{i_{\kappa} \cdot M_{12}}{dt} + \frac{i_{\kappa} \cdot M_{1\kappa32}}{dt},$$

Используя выражение получим общую расчетную формулу:

$$Um \cdot \sin(\omega t) = i_{\kappa} \cdot R_{\kappa} +$$

$$+ i_{\kappa} \left( \frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} + \frac{M_{1\kappa31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa32}}{dt} \right) + \quad (3.3.4)$$

$$+ \frac{di_{\kappa}}{dt} (L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21} + M_{1\kappa31} + M_{1\kappa32}),$$

Упростим уравнение, заменив дифференциал произведения на суммы двух дифференциалов:

$$Um \cdot \sin(\omega t) = Um \cdot \sin(\omega t) - i_{\kappa} \cdot R_{\kappa} -$$

$$- i_{\kappa} \cdot (L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21} + M_{\kappa31-1} + M_{\kappa32-1} + M_{\kappa32-2} + M_{\kappa31-2}) = \quad (3.3.5)$$

$$= \frac{di_{\kappa}}{dt} \left( \frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} + \frac{M_{1\kappa31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa32}}{dt} \right),$$

Сгруппируем однородные члены выражения для составления системы уравнений основного контура.

$$\frac{di_{\kappa}}{dt} = \frac{Um \cdot \sin(\omega t) - 2i_{\kappa} \cdot R_{\kappa} - i_{\kappa} \left( \frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} + \frac{M_{1\kappa31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa32}}{dt} \right)}{L_1 + L_2 + M_{12}}, \quad (3.3.6)$$

Уравнение для короткозамкнутого контура:

$$0 = i_{\kappa3} \cdot R_{\kappa3} + \frac{d\Psi_{\kappa31}}{dt}; \quad (3.3.7)$$

Где:  $\Psi_{\kappa3}$  - потокосцепление короткозамкнутого контура, представляющий собой суммарный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки индуктивности и взаимноиндуктивности короткозамкнутого контура.

Произведем для короткозамкнутого контура операции преобразования как для основного контура и получим окончательный вид :

$$\frac{i_{k3}}{dt} = \frac{-i_{k3} \cdot R_{k3} - i_{k3} \left( \frac{L_{k3}}{dt} + \frac{M_{k31k32}}{dt} + \frac{M_{1k31}}{dt} + \frac{M_{1k32}}{dt} \right)}{L_{k3}}, \quad (3.3.8)$$

### 3.4 Алгоритм расчёта системы уравнений

Система уравнений, состоящая из основного контура, короткозамкнутого контура, уравнения механического контура и скорости амплитуды, не может быть решена аналитическими методами, поэтому для расчёта режимов работы виброактиватора выше приведенные системы уравнений рассчитаем численными методами Рунге-Кутты четвертого порядка, составим алгоритм расчета системы. Метод Рунге-Кутты обладает большой точностью. Метод Эйлера, или метод касательных, не столь точен. Этот метод очень удобен для практических вычислений.

Система расчета состоит из итерационного определения четырех коэффициентов K, M, S, C:

$$K(t, l, l_k, x, y) := \frac{k1(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot k2(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot k3(t, l, l_k, x, y) + k4(t, l, l_k, x, y)}{6}$$

$$M(t, l, l_k, x, y) := \frac{m1(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot m2(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot m3(t, l, l_k, x, y) + m4(t, l, l_k, x, y)}{6}$$

$$S(t, l, l_k, x, y) := \frac{s1(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot s2(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot s3(t, l, l_k, x, y) + s4(t, l, l_k, x, y)}{6}$$

$$C(t, l, l_k, x, y) := \frac{c1(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot c2(t, l, l_k, x, y) + 2 \cdot c3(t, l, l_k, x, y) + c4(t, l, l_k, x, y)}{6}$$

Алгоритм расчетов будем производить, учитывая соответствующие коэффициентами, во времени. Матрица для алгоритма расчета выглядит так:

$$\begin{pmatrix} t_{i+1} \\ l_{i+1} \\ l_{k_{i+1}} \\ y_{i+1} \\ x_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_i + h \\ \text{if}(l_i + K(t_i, l_i, l_{k_i}, x_i, y_i) \geq 0, l_i + K(t_i, l_i, l_{k_i}, x_i, y_i), 0) \\ l_{k_i} + M(t_i, l_i, l_{k_i}, x_i, y_i) \\ y_i + S(t_i, l_i, l_{k_i}, x_i, y_i) \\ \text{if}(x_i + C(t_i, l_i, l_{k_i}, x_i, y_i) \geq X0, X0, x_i + C(t_i, l_i, l_{k_i}, x_i, y_i)) \end{pmatrix}$$

Первый ряд матрицы задаёт время расчёта с определённым шагом  $t_i+h$ . Второй ряд матрицы, рассчитывает ток  $I_i$  в основном контуре, учитывает наличие диода, третий ряд учитывает ток  $I_{k_i}$  в короткозамкнутом витке, четвертый ряд учитывает скорость движения активатора, пятый ряд учитывает смещение активатора относительно средней точки.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИБРОАКТИВАТОРА

### 4.1 Частотные характеристики при изменении частоты питающего напряжения и механического сопротивления

Соблюдая условие не превышения допустимой плотности тока в проводнике катушек, необходимо при уменьшении частоты снижать и величину питающего напряжения, соблюдая постоянство соотношения амплитуды и частоты питающего напряжения  $U/f=const$ .

Произведем расчет частотных характеристик на математической модели для нефти. Расчёт будем производить с постоянным начальным зазором  $X_0=0,004$  мм, собственной частотой системы  $f_0=70$  Гц, и изменениями следующих параметров работы виброактиватора и жидкости:

$U$  – амплитуда питающего напряжения, В;

$f$  – частота питающего напряжения, Гц;

$Rm_0$  – механическое сопротивление, кг/с;

Построим характеристики зависимости основных параметров МВО в зависимости от времени:

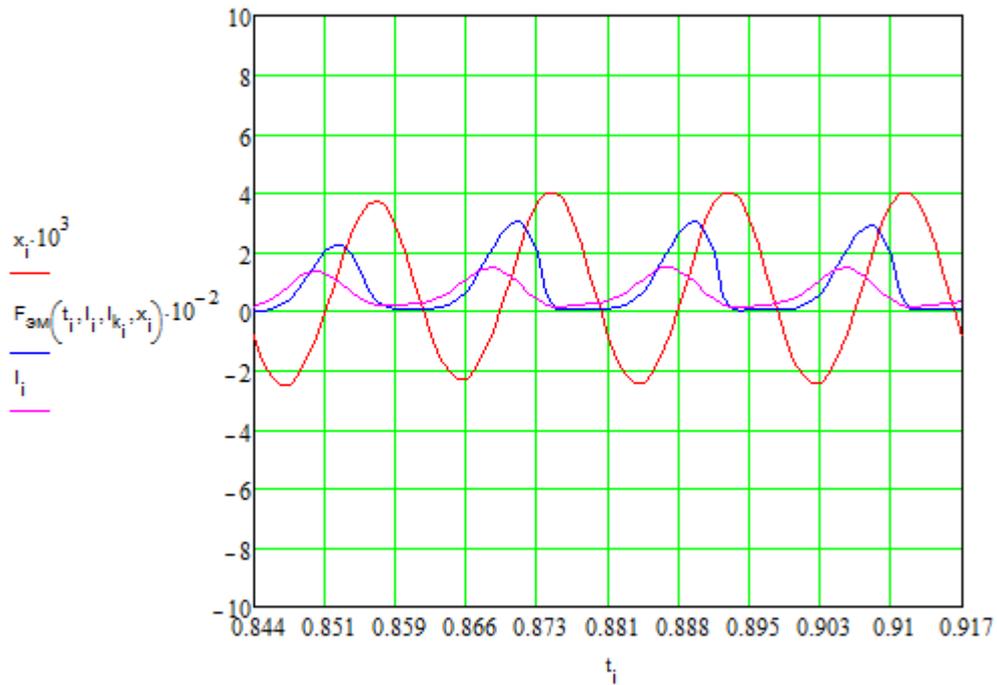


Рисунок 4.1.1 – График частотных характеристик при  $f=55 \text{ Гц}$ ,  $U=275\text{В}$ ,  
 $Rm=120 \text{ кг/с}$ .

Как видно из рисунка 4.2, амплитуда колебаний активатора составляет 7,4мм при этом величина тока протекающего в основной катушке равна 0,59А.

Произведем расчеты по математической модели при диапазоне значений частот питающего напряжения  $f=30\dots70 \text{ Гц}$ , с шагом  $5 \text{ Гц}$ , и значениях механического сопротивления  $Rm_0=80, 100, 120, 150, 170 \text{ кг/с}$ , и занесем полученные данные в таблицу.

Полученные данные расчетов частотных характеристик сведены в таблицах 4.1.1...4.1.5

Таблица 4.1.1 – Данные расчетов при механическом сопротивлении  $Rm_0=80 \text{ кг/с}$ .

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	150	175	200	225	250	275	300	325	350
$\Delta x$ , мм	3,1	3,4	4,3	4,9	7,7	7,6	7,1	3,7	2,6

$I_d, A$	0,56	0,6	0,55	0,55	0,49	0,61	0,87	0,7	0,68
$I_{кз}, A$	84,3	61,5	47	68,4	107,9	178,9	97,9	35,6	32
$V, м^3/час$	0,4	0,5	1,1	1,2	1,4	1,3	1,3	0,7	0,4

На основе полученных данных, на математической модели, построим график частотных характеристик:

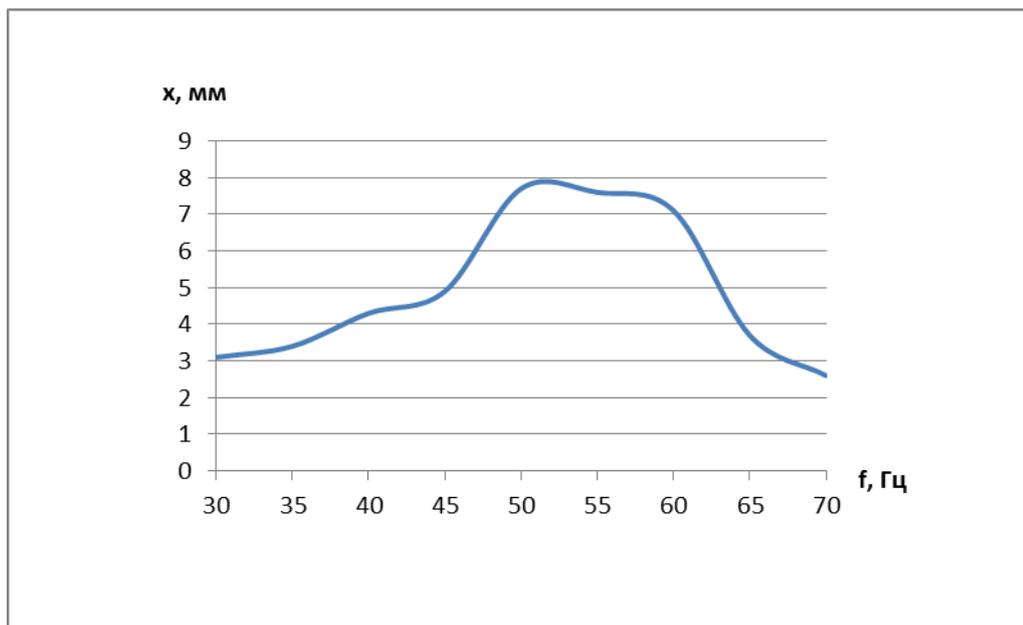


Рисунок 4.1.2 – График зависимости амплитуды колебаний активатора от частоты питающего напряжения при  $Rm=80 \text{ кг/с}$ .

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний активатора достигается при частоте  $f=50 \text{ Гц}$ , так же, согласно таблице 4.1.1, величина максимального тока в катушках составляет  $I_{max}=0,87A$ .

Аналогично производится расчет при значениях механического сопротивления  $Rm_0=100 \text{ кг/с}$ , и полученные данные заносятся в таблицу 4.1.2.

Таблица 4.1.2 – Данные расчетов при механическом сопротивлении  $Rm=100 \text{ кг/с}$ :

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	150	175	200	225	250	275	300	325	350
$\Delta x$ , мм	4,2	5,6	5,7	7,4	7,4	7,2	5,5	3,6	2,6
$I_d$ , А	0,6	0,56	0,57	0,55	0,59	0,73	0,78	0,71	0,68
$I_{кз}$ , А	27,8	35,9	56	89	129,7	160,7	102	52	39,4
V, м <sup>3</sup> /час	0,52	0,77	1,0	1,1	1,3	1,2	0,8	0,4	0,2

На основе полученных данных, на математической модели, построим график частотных характеристик:

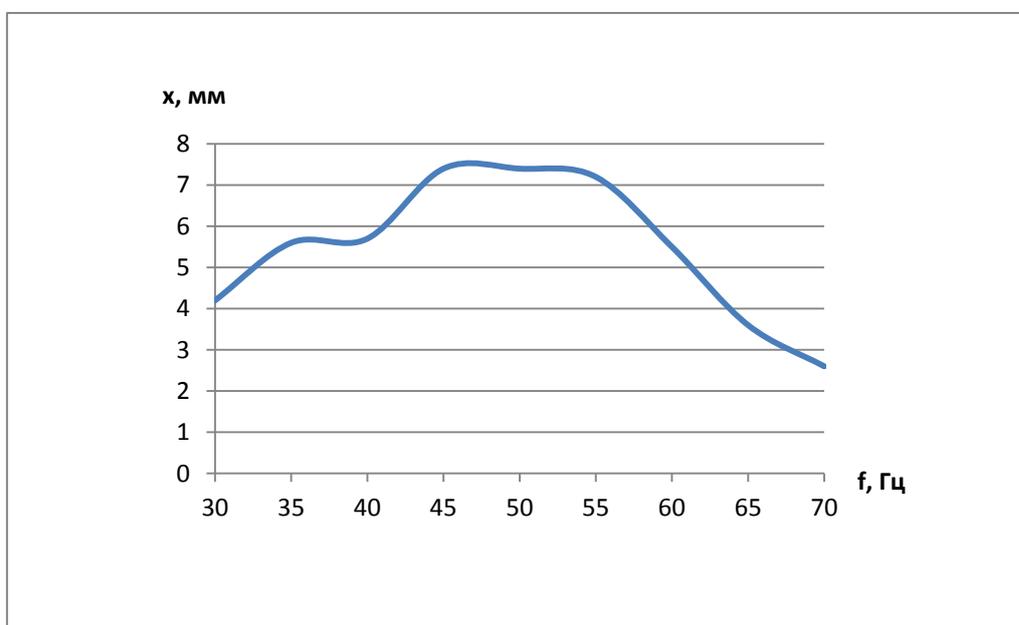


Рисунок 4.1.3 – График зависимости амплитуды колебаний активатора от частоты питающего напряжения при  $Rm=100$  кг/с .

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний активатора достигается при частотах  $f=45...50$  Гц, так же, согласно таблице 4.1.2, величина максимального тока в катушках составляет  $I_{max}=0,68$  А.

Аналогично производится расчет при значениях механического сопротивления  $Rm_0=120$  кг/с, и полученные данные заносятся в таблицу 4.1.3.

Таблица 4.1.3 – Данные расчетов при механическом сопротивлении  $Rm=120 \text{ кг/с}$ :

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	150	175	200	225	250	275	300	325	350
$\Delta x$ , мм	2,7	3,2	4,5	4,6	4,6	5,2	6,6	3,3	2,5
$I_d$ , А	0,58	0,54	0,57	0,6	0,49	0,68	0,79	0,7	0,68
$I_{кз}$ , А	17	30,8	59	89,9	107,9	129,3	149,7	61,2	45,8
V, м <sup>3</sup> /час	0,2	0,2	1	1	1,1	1,3	1,2	0,3	0,17

На основе полученных данных, на математической модели, построим график частотных характеристик:

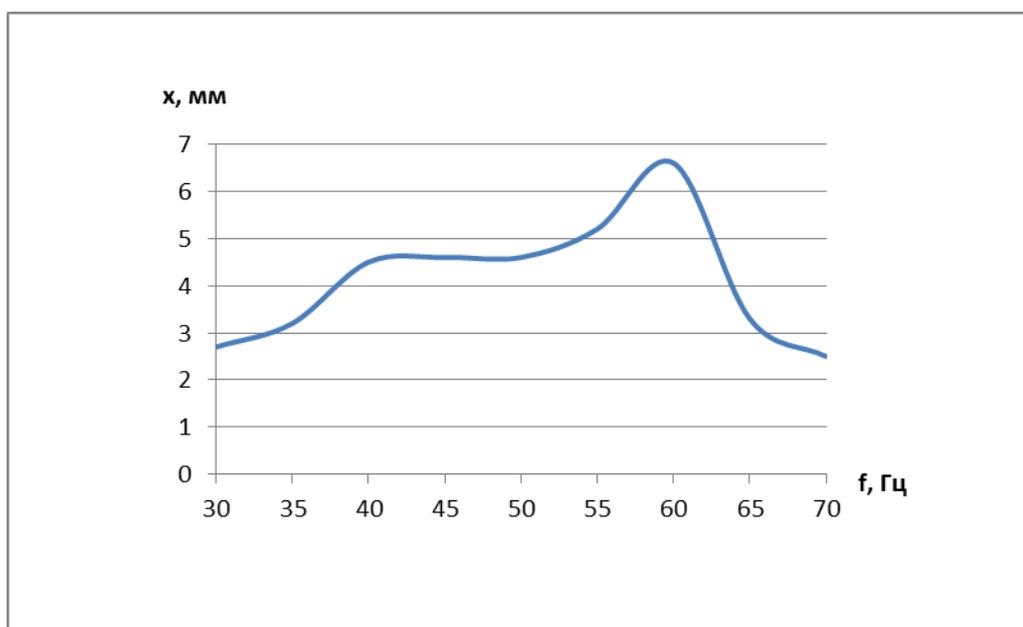


Рисунок 4.1.4 – График зависимости амплитуды колебаний активатора от частоты питающего напряжения при  $Rm=120 \text{ кг/с}$ .

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний активатора достигается при частоте  $f=60 \text{ Гц}$ , так же, согласно таблице 4.1.3, величина максимального тока в катушках составляет  $I_{max}=0,79 \text{ А}$ .

Аналогично производится расчет при значениях механического сопротивления  $Rm_0=150 \text{ кг/с}$ , и полученные данные заносятся в таблицу 4.1.4.

Таблица 4.1.4 – Данные расчетов при механическом сопротивлении

**$Rm=150$  кг/с:**

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	150	175	200	225	250	275	300	325	350
$\Delta x$ , мм	2,3	3	3,5	6,4	4,6	4,2	3,6	2,9	2,6
$I_d$ , А	0,59	0,55	0,6	0,7	0,7	0,65	0,69	0,7	0,68
$I_{кз}$ , А	31,7	35,1	58,4	87,8	117	129,3	87	65,2	51,9
$V$ , м <sup>3</sup> /час	0,1	0,1	0,9	1	1	0,4	0,2	0,2	0,1

На основе полученных данных, на математической модели, построим график частотных характеристик:

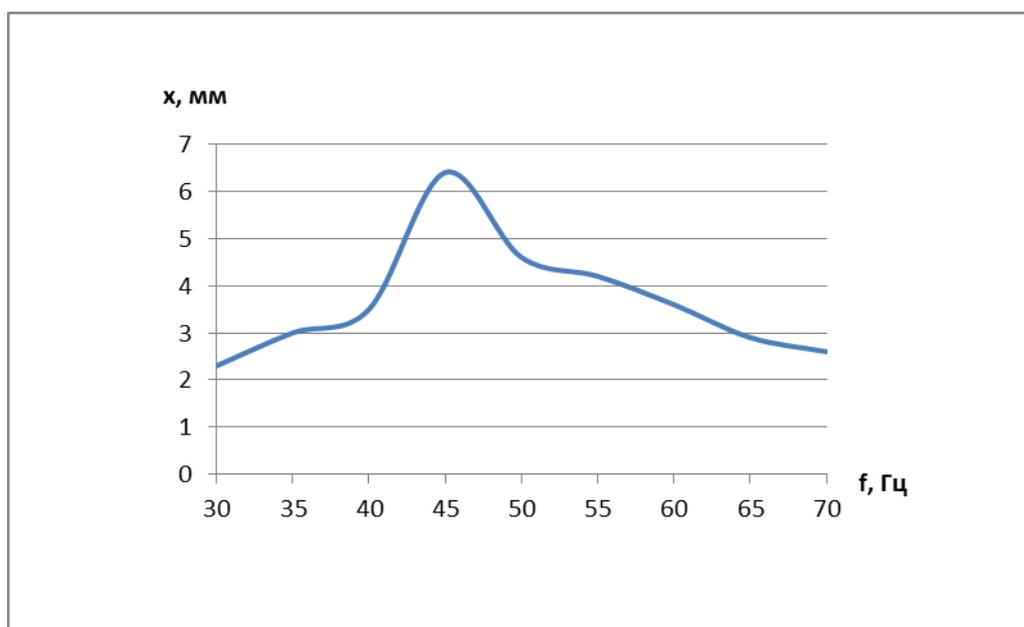


Рисунок 4.1.5 – График зависимости амплитуды колебаний активатора от частоты питающего напряжения при  **$Rm=150$  кг/с** .

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний активатора достигается при частоте  **$f=45$  Гц**, так же, согласно таблице 4.1.4, величина максимального тока в катушках составляет  **$I_{max}=0,7$  А**.

Аналогично производится расчет при значениях механического сопротивления  **$Rm_0=170$  кг/с**, и полученные данные заносятся в таблицу 4.1.5.

Таблица 4.1.5 – Данные расчетов при механическом сопротивлении

$Rm=170$  кг/с:

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	150	175	200	225	250	275	300	325	350
$\Delta x$ , мм	2,6	2,9	3,2	3,2	4,2	5,7	3,2	2,7	2,2
$I_d$ , А	0,57	0,55	0,55	0,55	0,58	0,78	0,68	0,7	0,67
$I_{кз}$ , А	35,3	37,3	51,2	51,5	59	115	81,6	65,8	54
V, м <sup>3</sup> /час	0,1	0,1	0,8	0,8	0,9	1	0,2	0,1	0,1

На основе полученных данных, на математической модели, построим график частотных характеристик:

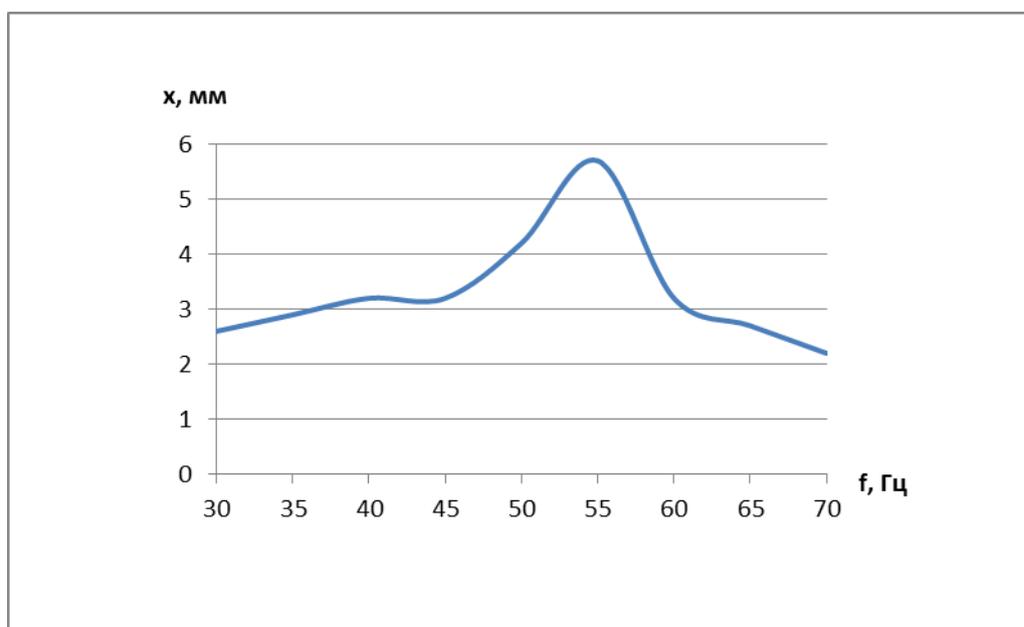


Рисунок 4.1.6 – График зависимости амплитуды колебаний активатора от частоты питающего напряжения при  $Rm=170$  кг/с .

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний активатора достигается при частоте  $f=55$  Гц, так же, согласно таблице 4.1.5, величина максимального тока в катушках составляет  $I_{max}=0,78$  А.

Исходя из полученных данных анализа режимов работы МВО, определены рекомендации по выбору элементов электропривода. Диапазон

изменения резонансных частот от 30 до 70 Гц, напряжений от 150 до 350 В, максимальный ток протекающий в катушке 0,9 А.

## ГЛАВА 5. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ

### 5.1 Схема подключение виброактиватора

Основными элементами схемы подключение виброактиватора являются сам виброактиватор, преобразователь частоты и блок питания, который должен включать в себя диод, автоматический выключатель. Общая схема подключение виброактиватора к электрической сети приведена на рис. 5.1.1

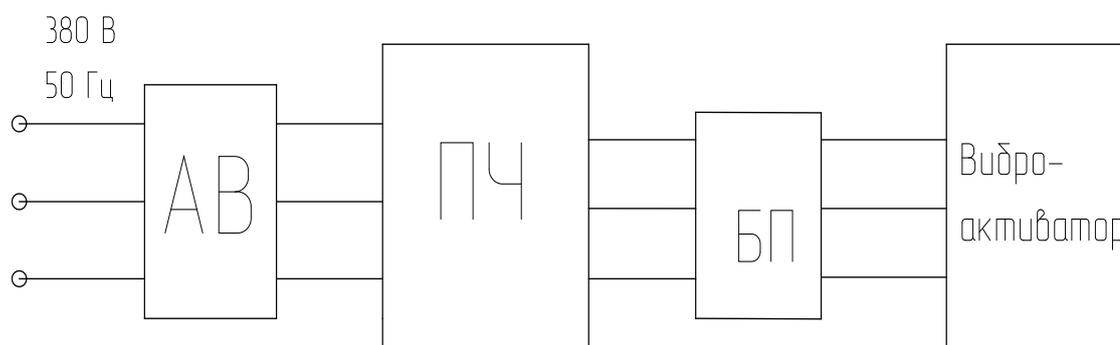


Рисунок 5.1.1 - Общая схема подключения виброактиватора

### 5.2 Выбор преобразовательного устройства для системы

Выбор частотного преобразователя и автоматического выключателя осуществляется по данным, полученным в результате расчёта режимов работы виброактиватора на математической модели. Исходными данными для этого являются величина тока, напряжение, подаваемое на обмотки виброактиватора и частота напряжения.

Максимальный ток единичного МВО:

$$I_{ед.МВО} = I_{max} \cdot k_z = 0,9 \cdot 1,1 = 1 \text{ А}, \quad (5.2.1)$$

где:

$I_{max}$  - максимальный ток, протекающий в катушке;

$k_3$  - коэффициент запаса прием равным 1,1;

С учетом того, что виброактиватор содержит 3 блока по 6 МВО, то:

$$I_{\phi \max} = I_{\text{ед.МВО}} \cdot N = 1 \cdot 6 = 6 \text{ А,}$$

где:

N – количество МВО запитанных от одной фазы;

Диапазон напряжений, который необходимо обеспечить для регулирования режимов работы виброактиватора, составляет от 150 до 350 В.

Для обеспечения резонансного режима работы обработки виброактиватором необходимо менять частоту питающего напряжения в диапазоне от 30 до 70Гц.

По справочным данным выбираем частотный преобразователь марки **Веспер EI-7011-003Н**. Данный преобразователь позволяет равномерное и экономичное регулирования производительности путем изменения частоты. Внешний вид и характеристики частотного преобразователя приведены на рисунке 5.2.1 и таблице 5.2.1 [4].



Рисунок 5.2.1 – Внешний вид преобразователя частоты Веспер EI-7011-003Н.

Таблица 5.2.1 - Характеристики частотного преобразователя

Наименование параметра	Величина
Максимальная выходная мощность ПЧ, кВт	2,2
Максимальный ток нагрузки, А	6,2
Номинальное напряжение на входе, В	380 (+10%-15%)
Диапазон регулирования напряжения, В	От 0 до 380
Частота питающей сети, Гц	$50 \pm 5\%$
Диапазон регулирования частоты, Гц	1-400
Вес, кг	4,0

### 5.3 Выбор диода

Для обеспечения работы виброактиватора на частоте 70 Гц выбираем диод марки КД270Л. Характеристики диода приведены ниже:

-  $U_{об.мах} = 400$  В.

-  $I_{пр.мах} = 7,5$  А.

- Диапазон рабочих температур  $-60 \dots +130$  С°

- Гарантийная наработка не менее – 10000 ч.

## 5.4 Выбор автоматического выключателя

В схеме подключения виброактиватора, как и любого электротехнического устройства, должен быть предусмотрен автоматический выключатель. Исходя из параметров работы виброактиватора для его подключения к промышленной сети выбираем автоматический выключатель типа ВА-101 ЗР 6А. Характеристики данного выключателя приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.4.1 Характеристики выключателя

Количество полюсов	ЗР
Номинальный ток:	6 А
Отключающая способность:	4,5 кА
Номинальное напряжение	400 В

## 5.5 Выбор кабеля сети

Учитывая, что виброактиватор в определённой степени является переносным, он должен быть оборудован кабелем, позволяющим манипулировать устройством в пределах зоны разгрузки. Длина кабеля в этом случае определяется конкретными условиями применения виброактиватора. По условиям применения взрывозащищённого электрооборудования выбираем длину кабеля, равную 20 метров.

Марка кабеля, которая рекомендована для применения в указанных условиях, соответствует КГН 4×1,5 мм<sup>2</sup>.

Выбираем кабель марки КГН (4х1,5) с  $I_{доп} = 20$  А. Кабель силовой гибкий с медными многопроволочными жилами с резиновой изоляцией в резиновой маслостойкой оболочке, не распространяющей горение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ по моделированию, конструированию и разработке виброактиватора для разгрузки вязких жидкостей из ж/д цистерн можно сделать следующие выводы:

Моделирование режимов работы виброактиватора на основе разработанной математической модели позволяют производить расчёты основных показателей работы на стадии проектирования.

Предложена конструкция единичного модуля виброактиватора, разработана конструктивная схема многомодульного исполнения виброактиватора для применения при разгрузке ж/д цистерн, определены рекомендации начальных конструктивных установок виброактиватора при обработке вязких жидкостей.

Разработаны основные приёмы применения виброактиватора при разгрузке вязких нефтепродуктов из ж/д цистерн: при проведении разгрузочных работ необходимо периодически подстраивать частоту и амплитуду питающего напряжения для обеспечения работы виброактиватора в квазирезонансном режиме. Диапазон регулирования частоты может составлять от 30 до 70 Гц, диапазон регулирования амплитуды напряжения может составлять от 150 до 350 В.

Предложена трёхфазная электрическая схема подключения виброактиватора, обеспечивающая регулирование частоты и напряжения в заданном диапазоне. Подключение и регулирование указанных параметров обеспечивается применением элементов электропривода российского производства: частотного преобразователя марки Веспер EI-7011-003Н, диодов марки КД270Л, автоматического выключателя марки ВА-101 3Р 6А, кабель марки КГН (4х1,5).

## Список использованных источников

1. Паспорт вибратора электромагнитного активационного ВЭМА-0,3. – ОАО «СКБ Сибэлектромотор».
2. «Изучение физических свойств жидкостей»  
URL: [http://otherreferats.allbest.ru/physics/00043915\\_0.html](http://otherreferats.allbest.ru/physics/00043915_0.html) (дата обращения: 03.05.2016).
3. «Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (метод Рунге – Кутты): учеб. пособие / Ю.Н. Горелов; Федер. агентство по образованию. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2006. – 48 с.»
4. «Спецификация преобразователей частоты EI-7011»  
URL: <http://www.vesper.ru/catalog/invertors/ei-7011/specification/> (дата обращения: 12.05.2016).
5. «Справочники ГОСТ, СП, СНиП, СанПиН, стандарты и нормативные документы»  
URL: <http://www.technormativ.ru/> (дата обращения: 12.05.2016).
6. «И.В. Прозорова, Ю.В. Лоскутова, Н.В. Юдина, С.В. Рикконен, В.А. Данекер, Изменение реологических свойств нефтей под воздействием виброструйной магнитной активации. Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности. Изд. Томского университета, т №2, 2002г.»
7. «НЕФТЬ-ГАЗ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА»  
URL: <http://www.dobi.oglib.ru/bgl/4728/103.html> (дата обращения: 23.04.2016).
8. «ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСТРУЙНОЙ МАГНИТНОЙ АКТИВАЦИИ (ВСМА) НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ НЕФТИ»  
URL: <http://runeft.ru/upload/iblock/8cb/8cbc218762bf5d1315881799d2012c98.pdf> (дата обращения: 15.04.2016).

9. «Повышение эффективности транспортировки и хранения вязких нефтепродуктов на основе применения электроподогрева. Хасанов.М.Р Уфа 2004г.»
10. «Основы виброструйной магнитной активации жидких сред / В. А. Данекер, В. В. Доленко // Современная техника и технологии, 28 февраля - 3 марта 2000 года, Томск / М-во образования РФ; ТПУ. — Томск, 2000».
11. «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность»  
URL: [http://www.tehbez.ru/Docum/DocumShow\\_DocumID\\_133.html](http://www.tehbez.ru/Docum/DocumShow_DocumID_133.html) (дата обращения: 15.05.2016).
12. СанПиН 2.1.7.728-99 «Правила сбора, хранения и удаления отходов».
13. «Большая Энциклопедия Нефти Газа»  
URL: [http://www.tehbez.ru/Docum/DocumShow\\_DocumID\\_133.html](http://www.tehbez.ru/Docum/DocumShow_DocumID_133.html) (дата обращения: 20.03.2016).
14. ГОСТ 12.1.012-90 «Вибрационная безопасность. Общие требования».
15. «Коршак А.А., Шаммазов А.М. Основы нефтегазового дела/ Учебник для вузов. — 3-е изд., испр. и доп. — Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2005. — 528 с.№».
16. «Разогрев и слив вязких и застывающих продуктов из железнодорожных цистерн».  
URL: [http://www.nmexp.com/prod2\\_4.htm](http://www.nmexp.com/prod2_4.htm). (дата обращения: 10.04.2016).
17. «Расчет пружин»  
URL:  
[http://www.mirpruzhin.ru/raschet\\_prugin\\_sgotia/?p99=1&p1=1&p2=1&p3=4.6&p4=25&p6=30&p7=4&p9=28&p10=3&p22=1&submit=+](http://www.mirpruzhin.ru/raschet_prugin_sgotia/?p99=1&p1=1&p2=1&p3=4.6&p4=25&p6=30&p7=4&p9=28&p10=3&p22=1&submit=)  
(дата обращения: 05.05.2016).