

Содержание

1	Измерение расхода воды в промышленности. Общие положения. Основные типы расходомеров.....	3
1.1	Роль и место измерения расхода материальных средств	3
1.2	Основные понятия расходомерии.....	4
1.3	Основные типы расходомеров.....	6
1.3.1	Расходомер переменного перепада давления	6
1.3.2	Расходомер с мерным объемом	7
1.3.3	Вихревой расходомер.....	10
1.3.4	Турбинный расходомер.....	13
1.3.5	Расходомер постоянного перепада давления.....	15
1.3.6	Электромагнитный расходомер.....	17
1.4	Сравнение расходомеров. Особенности использования. Достоинства, недостатки	20
2	Электромагнитные расходомеры. Способы построения электромагнитных датчиков и измерительных преобразователей.....	29
2.1.	История развития электромагнитного принципа измерения расхода ..	29
2.2	Эквивалентная схема замещения электромагнитного датчика расхода. Влияние помех общего и нормального видов	31
2.3	Способы питания электромагнитного датчика.....	34
2.4	Обзор способов построения измерительных цепей для электромагнитных датчиков расхода.....	36
2.4.1	Магнитная связь между индуктором и измерительной цепью.....	41
2.4.2	Измерительные цепи для датчика с синусоидальным магнитным полем.....	44
2.5	Способы компенсации квадратурных составляющих выходного сигнала электромагнитного датчика. Способы компенсации влияния электрохимической Э.Д.С.	52
2.5.1	Измерительные цепи расходомеров типа ИР.....	52
2.5.2	Измерительные цепи электромагнитных датчиков с частотой питания, кратной 50Гц	56
2.5.3	Электромагнитные расходомеры с емкостными электродами	58
2.5.4	Электромагнитные расходомеры с магнитным полем, изменяющимся по линейному закону.....	60
2.5.5	Расходомеры с импульсным магнитным полем	62
2.5.6	Расходомеры с однополярным магнитным полем.....	64

2.5.7	Расходомеры с двухполярным магнитным потоком	66
3	Газоанализаторы на основе термохимического принципа действия	72
3.1	Термоэлементы прямого подогрева	72
3.1.1	Термохимический преобразователь. Принцип действия. Особенности использования. Область применения	72
3.1.2	Термокондуктометрический преобразователь	72
3.1.3	Термоконвекционный преобразователь	73
3.1.4	Термосорбционный преобразователь	74
3.2	Термохимический (термокаталитический) метод	76
3.2.1	Уравнение теплового баланса термоэлементов прямого подогрева ..	77
3.3	Измерительные схемы термохимического датчика	79
3.3.1	Мостовая, авторегуляторная, астатическая измерительные схемы....	79
3.3.2	Схема со стабилизацией температуры компенсационного элемента.	82
3.3.3	Схема преобразователя со стабилизацией температуры ИЭ	82
3.3.4	Схема преобразователя со стабилизацией температур поверхностей ИЭ и КЭ	83
3.3.5	Схема преобразователя с термостатированием по дополнительному термоэлементу	84
3.4	Использование термоэлементов прямого подогрева.....	85
3.4.1	Измерение скорости потока, расхода, давления и плотности.....	86
3.4.2	Использование термохимического датчика для анализа отходящих дымовых газов в теплоэнергетических установках	88
4	Помехи общего и нормального вида	89
4.1	Основные причины появления помех общего и нормального видов на примере электромагнитных датчиков, термохимических преобразователей и термоэлектрических преобразователей	89
4.2	Способы оценки помехозащищенности измерительных преобразователей. Коэффициенты подавления помех общего и нормального видов, эффективный коэффициент помехозащищенности ...	90
4.3	Способы защиты от помех. Симметричный вход. Гальваническое разделение. Фильтрация.	92
4.3.1	Симметричный вход.....	92
4.3.2	Сочетание симметричного входа с экранированием.....	95
4.3.3	Фильтрация	98

1 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РАСХОДОМЕРОВ

Развитие технологии, ужесточение требований по ресурсосбережению, обращение к экологически чистым производствам, рост цен на энергоносители ведут к необходимости все более широкого применения приборов, предназначенных для измерения расхода и количества жидких сред. Данные приборы находят все большее применение для контроля за технологическими процессами, за использованием природных ресурсов, внутрипроизводственных процессов, коммерческих целей.

Перспективны для решения этих вопросов электромагнитные расходомеры, обладающие рядом очевидных достоинств: отсутствием подвешенных элементов в измерительном канале; уровнем потерь напора, не превышающем потерь в гладком трубопроводе; высокой стабильностью и надежностью показаний в тяжелых условиях эксплуатации; инвариантностью к физическим характеристикам среды (вязкость, плотность и пр.); возможность использования в системах телеизмерений и телеуправления и пр.

1.1 Роль и место измерения расхода материальных средств

Измерение расхода по массовости уступает лишь измерению температуры и занимает примерно 25% всех промышленных измерений. Однако, с экономической точки зрения затраты на эти измерения более значительны вследствие более высокой стоимости соответствующего оборудования.

Измерение, например, расхода только в теплоэнергетических установках [2] предполагает необходимость обработки потоков следующих веществ: жидких газов (гелий, азот, водород), жидких металлов (ртуть, натрий, литий), кислот, щелочей, горячей и холодной воды, сточных вод, хладагентов, сухого и влажного пара, жидких и газообразных углеводородов, смесей угольной пыли с водой и воздухом, смеси золы, дегтя и воды и т.п. При этом требования к аппаратуре, предназначенной для измерения соответствующих потоков могут изменяться в весьма широких пределах. Так значения расхода могут изменяться в пределах от 0.0001 до 1000000 м³/час; диаметр трубопровода от 2 до 3000мм; температура от 4 до 1000 К. Допустимая погрешность измерения - от 0.25 до 4%.

Для обеспечения указанных потребностей используется значительное

число разнотипных технических средств. Например, в Европе выпускаются более 100 различных типов расходомеров. Эти многочисленные и разнообразные устройства можно разделить по общему принципу действия на шесть наиболее распространенных типов [2]:

- расходомеры переменного перепада давления;
- камерные счетчики;
- электромагнитные расходомеры;
- турбинные расходомеры;
- расходомеры постоянного перепада давления;
- вихревые расходомеры.

Все эти типы делятся на две основные группы расходомеров, действие которых основано на извлечении энергии из измеряемой среды и расходомеры, действие которых основано на передаче энергии измеряемой среде. Большинство расходомеров основано на извлечении энергии из измеряемой среды, что сопровождается потерей давления. Как правило извлечение энергии связано с сужением канала, по которому направляется поток. Это сужение создается путем помещения в поток ротора (турбинные расходомеры); тела не обтекаемой формы (вихревые расходомеры) или сужающего устройства (сопла или диафрагмы). В данном случае кинетическая энергия потока преобразуется в потенциальную энергию, которая используется для определения значения расхода. В указанных случаях преобразование энергии измеряется с помощью вращательного движения, частоты колебаний или измерения перепада давлений.

При сообщении энергии измеряемой среде может использоваться магнитное поле, ультразвуковое излучение или тепловое измерение. В этих случаях изменяются свойства потока (в случае магнитного поля) или поток изменяет свойства сообщаемой энергии (в случае ультразвуковых колебаний) или температуры потока. Нами будут рассмотрены более подробно каждый из шести типов наиболее часто встречающихся расходомеров.

1.2 Основные понятия расходомерии

В соответствии с [3] под расходом понимается физическая величина, равная пределу отношения приращения массы или объема, или количества жидкости, протекающих в трубопроводе через сечение, перпендикулярное направлению скорости потока, к интервалу времени, за который это приращение произошло, при неограниченном уменьшении интервала времени.

Обозначается расход буквой Q и, соответственно,

Q_m - массовый расход;

Q_o - объемный расход;

$Q_{\text{мол}}$ - количественный расход.

Расходомер - измерительный прибор или совокупность приборов, предназначенных для измерения расхода. Соответственно, расходомеры могут быть для жидкости или газа и измерять либо массовый, либо объемный, либо количественный расходы.

Датчик расхода - средство измерений расхода, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающийся непосредственному восприятию наблюдателя.

Под счетчиком жидкости подразумевается измерительный прибор, предназначенный для измерения соответственно: либо объема, либо массы, либо количества жидкости (газа), протекающей в трубопроводе через сечение, перпендикулярное направлению потока.

Обзор, основанный на анализе Европейского рынка расходомеров, показывает, что доля расходомеров переменного перепада давления составляет 30%; камерных счетчиков - 26%; расходомеров постоянного перепада давления - 17%, электромагнитных расходомеров - 15%, турбинных счетчиков - 5%, ультразвуковых расходомеров - 2% и вихревых счетчиков - 2% [4]. Однако, в последние годы наметилась тенденция расширения рынка электромагнитных, ультразвуковых и особенно вихревых расходомеров за счет некоторого снижения числа приборов переменного перепада давления. Например, номенклатура продаваемых в Республике Беларусь расходомеров, используемых для целей теплоэнергетики имеет следующий вид: приборы переменного перепада давления - 34%; приборы на основе электромагнитных расходомеров - 33%; ультразвуковые приборы - 13%; турбинные расходомеры - 20% (данные комитета по энергоресурсосбережению и энергетическому надзору при Совете Министров РБ от 1.01.95г.).

Таким образом электромагнитные расходомеры имеют значительное распространение и их доля в общей массе применяемых средств непрерывно возрастает. Это объясняется рядом преимуществ данных типов расходомеров, о которых будет идти речь ниже.

1.3 Основные типы расходомеров

1.3.1 Расходомер переменного перепада давления

Расходомер переменного перепада давления - расходомер жидкости, принцип действия которого основан на зависимости перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, устанавливаемым в трубопроводе, или элементом трубопровода, от расхода жидкости или газа.

Принцип действия данного расходомера основан на том, что кинетическая энергия жидкости, проходящей с повышенной скоростью через сужающее устройство повышается за счет уменьшения потенциальной энергии давления. На рисунке 1.1 представлено распределение потока, проходящего через диафрагму. Разность давлений $P = P_1 - P_2$, вызванная возрастанием скорости, изменяется в функции квадрата расхода Q :

Таблица 1 - Расходомеры переменного перепада давления

Достоинства	Недостатки
Отсутствие движущихся частей.	Квадратичная зависимость между разностью давлений и расходом.
Широкая номенклатура типов, отличающихся конструкцией и размерами.	Рабочий диапазон ограничен значением 3:1 (4:1).
Пригодность для большинства газов и жидкостей.	Низкая точность.
Независимость стоимости от диаметра трубы.	Ухудшение точности при износе или повреждениях.
Простота.	Точность зависит от профиля скоростей и от плотности.
Отсутствие необходимости в градуировке сужающего устройства.	Высокая необратимая потеря давления (от 40 до 80 % перепада давления).
	Необходимость в частом обслуживании.
	Высокая стоимость и трудоемкость монтажа.

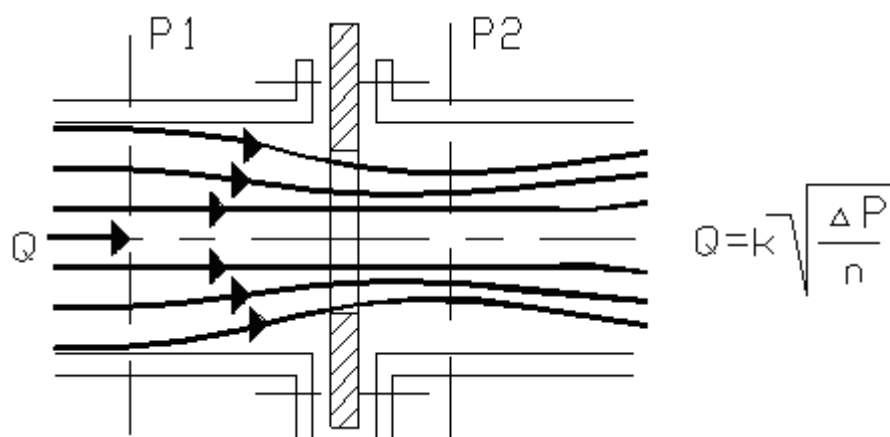


Рисунок 1.1 - Принцип действия расходомера переменного перепада давления с сужающим устройством в виде диафрагмы.

$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (1.1)$$

где

k - постоянный коэффициент ,

ρ - плотность жидкости.

Из этой формулы видно, что диапазон измерения существенно ограничен тем, что параметр, подлежащий измерению находится под знаком квадратного корня. Например, для обеспечения динамического диапазона измерения расхода 10, диапазон измерения разности давлений должен быть 100. Реально диапазон измерения расходов при помощи сужающих устройств находится на уровне 3:1, 4:1. Кроме того для вычисления расхода необходимо знать плотность измеряемой среды. Основные преимущества и ограничения , свойственные расходомерам с сужающим устройством, представлены в таблице 1.

1.3.2 Расходомер с мерным объемом

Согласно [3] камерным счетчиком жидкости называется такой счетчик, принцип действия которого основан на том, что при помощи различных преобразовательных элементов жидкость (или газ) разделяют на доли объема, а затем производят их циклическое суммирование.

Камерный счетчик при соответствующем обслуживании обладает высокой точностью и воспроизводимостью результатов. В области высоких значений вязкости он является непревзойденным по точности и диапазону

измерений. Основные достоинства и недостатки камерных счетчиков представлены в таблице 2.

Таблица 2. Камерные счетчики

Достоинства	Недостатки
Высокая точность, широкий диапазон измерений.	Малые допуски у движущихся частей, подверженных износу.
Высокая воспроизводимость результатов.	Необходимость в регулярном надзоре и обслуживании.
Пригодность для работы с высоковязкими жидкостями.	Непригодность для работы с загрязненными жидкостями, а также жидкостями, не обладающими смазывающими свойствами.
Возможность работы в условиях изменения вязкости в широких пределах.	Высокая стоимость, большие габариты и масса, в особенности при большом диаметре трубы.
Местная индикация и возможность получения на выходе импульсного сигнала.	Ограниченный наибольший расход для данного типоразмера.
Индикация непосредственно в единицах объема.	Сложность монтажа, высокая стоимость запасных частей.
Отсутствие необходимости во внешнем источнике энергии.	Большая потеря давления.
Практическое отсутствие влияния конфигурации трубопровода на точность измерения.	Повреждения при превышении допустимой скорости движения рабочего органа.
Высокая разрешающая способность импульсного выхода.	

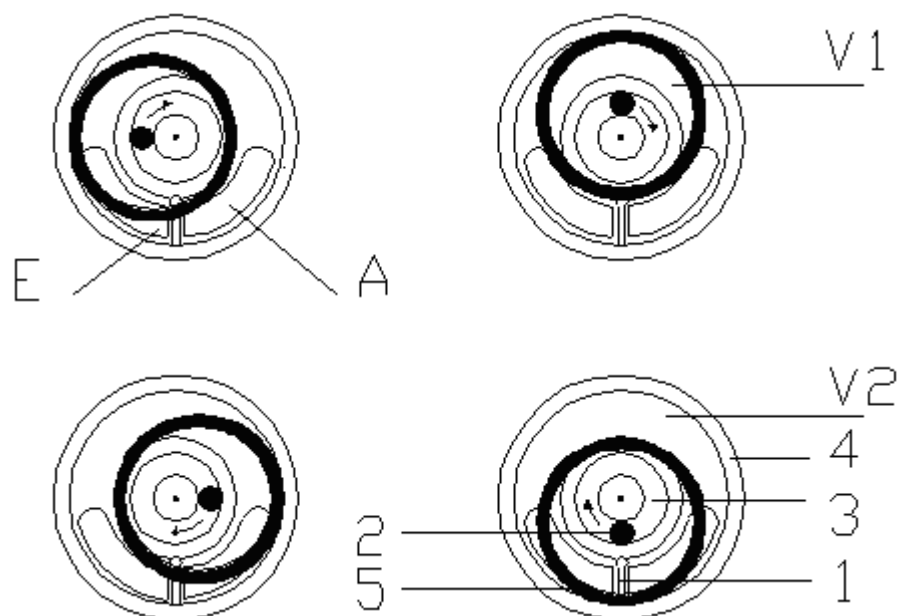


Рисунок 1.2 - Принцип действия камерного счетчика.

Благодаря своим техническим характеристикам счетчики данного класса широко используются при измерении жидкого топлива и других углеводородов для коммерческого распределения.

У счетчиков с кольцевым поршнем в цилиндрическом корпусе эксцентрично вращается пустотелый цилиндр (кольцевой поршень). При этом он перемещает определенный объем жидкости. Принцип действия поясняет рис. 1.2, где: 1 - перегородка, 2 - направляющая ПФА, 3 - кольцевое пространство, 4 - внешний цилиндр; 5 - внутренний цилиндр, E - входное отверстие, A - выходное отверстие.

Корпус состоит из неподвижного внешнего цилиндра и подвижного внутреннего цилиндра, связанных между собой перегородкой. Перегородка отделяет друг от друга входное и выходное отверстия, находящиеся в нижней части корпуса. В положении а объем $V1$ кольцевого поршня наполняется. Затем жидкость проталкивает кольцевой поршень в положение б. При этом наполняется объем $V2$ в корпусе и одновременно опорожняется наполненная часть $V2$. В положении с начинается опорожнение $V1$. Таким образом, при обороте кольцевого поршня перетекают два элементарных объема $V1+V2$. С помощью магнитной муфты движение внутреннего цилиндра передается счетному механизму. Частота вращения оси счетного механизма пропорциональна расходу.

1.3.3 Вихревой расходомер

Вихревым расходомером называется расходомер, принцип действия которого основан на зависимости частоты колебаний, возникающих в потоке в процессе вихреобразования, от расхода. Образование (генерация) вихрей объясняется следующим образом. При обтекании жидкостью препятствия у поверхностей последнего образуются неограниченные слои медленно движущейся вязкой жидкости. Если препятствие имеет не обтекающую форму, т.е. представляет собой угловатое тело, поток не может следовать вдоль поверхности тела со стороны, противоположной поступлению жидкости, в результате чего отдельные слои жидкости отрываются от тела и свертываются в вихри в зоне низкого давления за препятствием. Вихри генерируются поочередно разными сторонами тела. Частота их следования прямо пропорциональна скорости потока, что и является основой для создания подобных расходомеров.

Когда происходит образование вихря с одной стороны не обтекаемого тела, скорость жидкости у этой стороны увеличивается, а давление снижается. У противоположной стороны препятствия скорость уменьшается, а давление возрастает, чем создается перепад давления между противоположными поверхностями тела, затем перепад давления изменяет свой знак при образовании вихря у другой стороны не обтекаемого тела. Таким образом, распределение скорости и давления вокруг не обтекаемого тела изменяется с той же частотой, с которой происходит образование вихрей, и можно использовать различные методы для фиксации изменений давления или скорости.

На рисунке 1.3 показано обтекание жидкостью препятствия и генерация вихрей. На этом рисунке даны следующие обозначения: 1 - не обтекаемое тело, 2 - увеличение скорости, снижение давления; 3 - уменьшение скорости, повышение давления; 4 - давление.

Преимущества и недостатки вихревого расходомера представлены в таблице 3.

Скорость среды, при которой появляются вихри, определяется числом Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{4W}{\pi d \nu},$$

где

W - массовый расход;

d - диаметр трубопровода;

ν - вязкость среды.

При $Re < 2000$ вихри вообще не образуются ; при $Re > 10000$ имеют место четко сформированные вихри, а при $Re > 30000$ наблюдается линейное отношение между частотой вихреобразования и расходом контролируемой среды, не зависящее от дальнейшего изменения числа Re , а также от вида среды - она может быть как жидкой, так и газообразной. Поэтому без переградуировки один и тот же прибор используется для измерения расхода совершенно разных сред. Это свойство позволяет производить градуировку газовых расходомеров на воде.

Детектирование частоты генерации вихрей основано либо на периодическом изменении давления, либо на охлаждении не обтекаемого тела за счет уноса тепла вихрями. Данный тип расходомеров рассматривается как один из самых перспективных с точки зрения замены расходомеров с сужающим устройством.

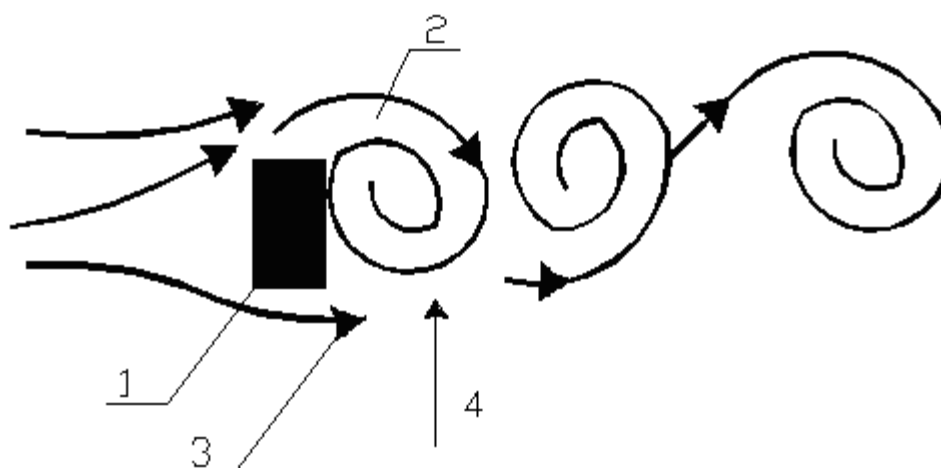


Рисунок 1.3 - Принцип действия вихревого расходомера

Таблица 3 - Вихревой расходомер

Достоинства	Недостатки
Низкая стоимость монтажа.	Невозможность для работы с высоковязкими, загрязненными жидкостями.
Высокая точность .	Ограниченный выбор конструкционных материалов.
Высокая долговременная воспроизводимость результатов.	Ограниченное число типоразмеров .
Широкий диапазон измерения расходов (10:1; 15:1).	Ограниченные верхние значения давления и температуры.
Минимальная потребность в обслуживании.	Ограниченная разрешающая способность импульсного выхода.
Отсутствие необходимости в градуировке.	Потеря давления, равная удвоенному значению скоростного напора.
Независимость градуированной характеристики от вязкости, плотности, давления и температуры.	
Возможность работы с газами и жидкостями.	
Частотный выход.	
Простота и взаимозаменяемость запасных частей.	
Возможность изменения на месте диапазона шкалы аналогового прибора.	
Простота монтажа.	

1.3.4 Турбинный расходомер

Турбинный расходомер к классу тахометрических расходомеров, принцип действия которых основан на зависимости скорости движения преобразовательного элемента, (в качестве которого служит турбина), установленного в трубопроводе или в специальной камере, от расхода жидкости (газа).

Основной частью турбинного расходомера является ротор с лопатками (турбина) подвешенный в потоке жидкости так, как это представлено на рисунке 1.4, где приведены следующие обозначения: 1 ротор, 2 - датчик скорости вращения ротора, 3 - вал, 4 - поток. На рисунке 1.4а представлен вариант расходомера с аксиальным расположением турбины, а на рисунке 1.4б - с тангенциальным расположением турбины.

Ротор приводится во вращение жидкостью, воздействующей на лопатки турбины. Угловая скорость ротора пропорциональна скорости движения жидкости, которая в свою очередь пропорциональна объемному расходу. Съем информации осуществляется, например, при помощи катушки индуктивности, расположенной вне корпуса расходомера, реагирующей на движение ротора. Катушка имеет магнитный сердечник, создающий магнитное поле, а лопатки ротора выполнены из ферромагнитного материала. Каждая лопатка, при прохождении вблизи датчика, вносит возмущение в магнитное поле и вызывает генерацию электрического импульса в катушке.

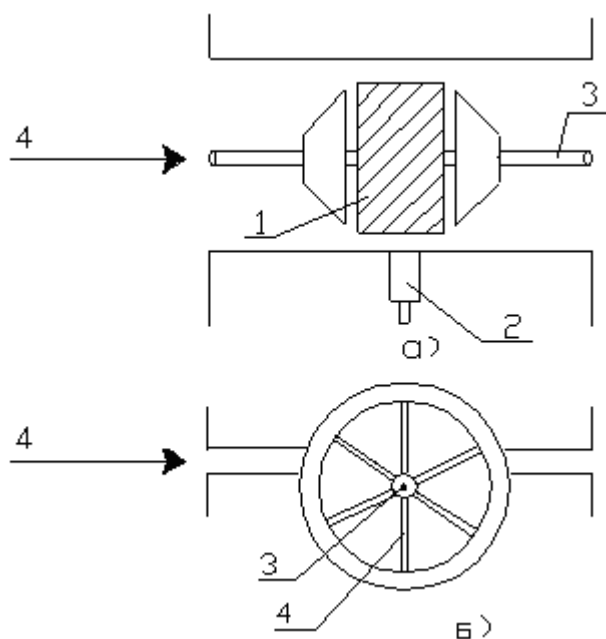


Рисунок 1.4 – Принцип действия турбинного расходомера

Таблица 4 - Турбинный расходомер

Достоинства	Недостатки
Высокая точность.	Непригодность для работы с высоковязкими средами.
Очень хорошая воспроизводимость результатов.	Необходимость в градуировке.
Диапазон измерения расходов 10:1.	Возможность повреждения при попадании газа.
Разнообразие условий применения и пригодности для работы в тяжелых условиях.	Сравнительно высокая стоимость.
Возможность работы в практически не ограниченном диапазоне давлений и в очень широком температурном диапазоне.	Значительные ограничения в отношении противодавления.
Широкий выбор типоразмеров с высокой максимальной пропускной способностью.	Износ движущегося органа.
Высокая надежность (только одна движущаяся часть).	Влияние состояния потока на выходе в расходомер.
Линейный частотный выход.	Необходимость во вторичном индикаторе.
Быстродействие.	Необходимость в фильтрации жидкости.
Малые размеры и масса.	
Простота монтажа.	
Гигиеничность.	

Правильно спроектированный расходомер обладает высокой точностью в диапазоне измерения расходов 1:10 и отличной воспроизводимостью результатов. Специально изготовленные образцы могут использоваться как образцовые средства измерения расхода. Турбинные расходомеры широко используются для точных измерений сырой нефти и нефтепродуктов при определении оплаты и при поставках потребителю.

Возможным ограничением для применения данного типа расходомера является наличие движущейся части - ротора и подшипника, подверженного износу. Однако, наработано достаточно много технических решений, существенно снижающих этот недостаток, например, при использовании для изготовления подшипников карбида вольфрама можно добиться срока службы расходомера свыше пяти лет при отсутствии обслуживания и в условиях работы с жидкостью, не обладающей смазывающими свойствами.

Достоинства и недостаток данного расходомера представлены в табл.4.

1.3.5 Расходомер постоянного перепада давления

К данным типам расходомеров относятся такие приборы, принцип действия которых основан на зависимости вертикального перемещения поплавка, изменяющего при этом площадь проходного отверстия трубопровода таким образом, что перепад давления по обе стороны поплавка остается постоянным от расхода жидкости или газа. Широко распространенным расходомером постоянного перепада давления является ротаметр, в котором поплавок перемещается внутри измерительной трубки, имеющей переменную площадь сечения [3].

В данных приборах используется тот же принцип, что и в расходомерах переменного перепада давления, т.е. зависимость между кинетической энергией жидкости и ее потенциальной энергией давления. Но во первых: диаметр сужающего устройства фиксирован и перепад давления изменяется с изменением давления, а во вторых: площадь суженной части канала изменяется в зависимости от расхода при постоянном перепаде давления.

Ротаметр представлен на рисунке 1.5, где обозначено: 1 - поплавок; 2 - нижний ограничитель хода поплавка; 3 - верхний ограничитель хода поплавка, 4 - коническая стеклянная трубка, 5 - поток. Диаметр поплавка равен внутреннему диаметру трубки в ее нижней части. Трубка постепенно расширяется в направлении снизу вверх. В этом же направлении движется жидкость, увлекая поплавок вверх. По мере подъема поплавок кольцевой зазор

между его краями и внутренней поверхностью трубки увеличивается до тех пор, пока подъемная сила, создаваемая разностью давлений сверху и снизу поплавок, не станет равной его весу.

Таблица 5 - Расходомер постоянного перепада давления

Достоинства	Недостатки
Низкая стоимость.	Непригодность для работы при высоких давлениях.
Простота.	Ограниченный максимальный расход.
Относительная независимость от конфигурации трубы перед расходомером	Необходимость вертикального монтажа.
Возможность измерения весьма малых расходов.	Прибор занимает много места.
Постоянная потеря давления.	Трудности снятия показаний при загрязнении стекла.
Диапазон измерения 10:1.	Значительное возрастание стоимости при применении защитного щита, панельном монтаже и т. д.
Линейная шкала расхода с прямым отсчетом.	Отсутствуют стандартные передающие интегрирующие устройства.
Отсутствие необходимости в источнике энергии.	

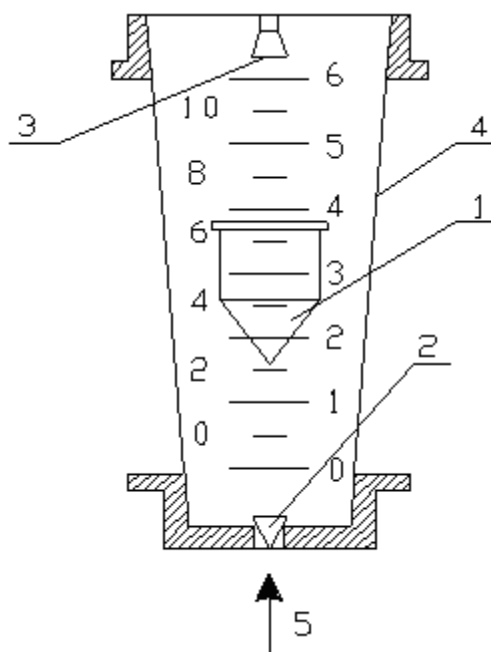


Рисунок 1.5 – Расходомер постоянного перепада давления

При малых расходах поплавков взвешен в жидкости вблизи нижнего конца трубки. При повышении расхода он поднимается к верхнему концу трубки. Расстояние от нижнего конца трубки до точки, в которой поплавок достиг равновесного состояния, линейно зависит от расхода.

Обычно погрешность ротаметров равно 12% в диапазоне расходов 10:1. Интервал допустимых температур имеет достаточно широкие пределы (- 45 до 200) С, максимальное рабочее давление ограничено значением 20 кгс/см². Данный расходомер можно применять для измерения очень малых расходов, например, 5 см³/мин, но максимальное значение расхода для этого прибора равно всего 250 см³/мин.

Основные достоинства и недостатки данного типа расходомера представлены в таблице 5.

1.3.6 Электромагнитный расходомер

Работа электромагнитного расходомера основана на открытом Фарадеем законе линейной зависимости между э.д.с., наводимой в проводнике, движущемся в магнитном поле, и скоростью его движения. На рисунке 1.6 представлен внешний вид расходомера, где приняты следующие обозначения: 1 - обмотка возбуждения, 2 - электроды, при помощи которых снимается э.д.с. с движущейся жидкости, 3 - внутренняя немагнитная труба, футерованная

диэлектрическим материалом, в которой и происходит измерение расхода, 4 - внешний магнитопровод, 5 - магнитные силовые линии.

Электромагнитный расходомер состоит из трубы, выполненной из немагнитной (как правило нержавеющей) стали, покрытой изнутри изолирующим материалом. Катушки возбуждения, расположенные снаружи трубы, создают магнитное поле. Жидкость, протекающая по трубе, играет роль проводника. Э.д.с., наводимая в жидкости, пропорциональна скорости потока.

Два небольших электрода, расположенных друг против друга заподлицо с поверхностью изолирующего слоя, воспринимают э.д.с. Наводимая э.д.с. не может быть использована непосредственно, т.к. она мала и источник э.д.с. обладает высоким внутренним сопротивлением. Воспринимаемый электродами сигнал направляется в устройство, которое осуществляет усиление, фильтрацию и нормирование выходного сигнала.

Датчик в виде простого отрезка трубы с внутренней футеровкой и двумя электродами не создает препятствия потоку, и потеря давления в данном случае не превышает потерю давления в прямой трубе такой же длины.

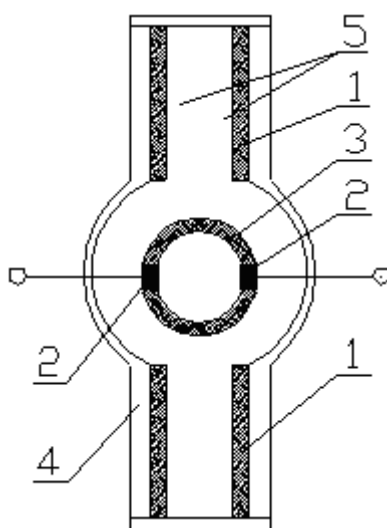


Рисунок 1.6 – Электромагнитный расходомер

Данные расходомеры позволяют успешно измерять расходы суспензий, пульп и жидкостей, содержащих твердые частицы.

Для покрытия внутренней поверхности трубы используют разницу, устойчивую к абразивным воздействиям: эмаль, полиуретан, фторопласт и др. материалы. В качестве материалов для изготовления электродов обычно используют нержавеющую сталь, однако, малые размеры электродов позволяют использовать и более редкие металлы, как, например, платина, тантал, иридий при сравнительно небольшом увеличении стоимости прибора.

Это означает, что электромагнитные расходомеры могут быть изготовлены из материалов, химически устойчивых по отношению к практически любым жидкостям. Поэтому данный тип расходомера используется для работы со многими сильно коррозирующими и агрессивными жидкостями и даже с жидкими металлами.

Основные достоинства и недостатки электромагнитных расходомеров представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Электромагнитные расходомеры

Достоинства	Недостатки
Отсутствие движущихся частей.	Жидкость должна быть электропроводной .
Датчик не содержит частей, создающих сопротивление потоку.	Невозможность работы с газами.
Химическая устойчивость практически к любым видам жидкости.	Повышенная стоимость особенно при малых типоразмерах.
Возможность работы с суспензиями, не смазывающими жидкостями, и многокомпонентными потоками.	Необходимость в источнике питания.
Независимость показаний от вязкости, давления, температуры, плотности или проводимости.	Возможность загрязнения электродов в некоторых случаях применения.
Линейная градуированная характеристика.	Необходимость в градуировке.
С увеличением размеров прибора его стоимость растет не так быстро, как у других типов расходомеров.	

1.4 Сравнение расходомеров. Особенности использования.

Достоинства, недостатки

Каждый из описанных выше расходомеров имеет свои преимущества и недостатки, но ни один из них не сочетает в себе все полезные характеристики других. В связи с этим процедура выбора нужного расходомера представляется особенно актуальной.

Пользуясь характеристиками жидкости, расход которой необходимо измерять (степень загрязненности, вязкость, электропроводность), можно сразу исключить из рассмотрения некоторые типы расходомеров и проводить выбор из меньшего числа приборов, способных справиться с поставленной задачей. После определения типов расходомеров, пригодных для использования необходимо сопоставить их возможности с конкретными условиями применения. Которые содержат среди прочих параметров давление, температуру, пределы измерения, потерю давления и пр. Для общего сопоставления характеристик можно пользоваться таблицей 7. Следует помнить, что данные таблицы носят общий характер.

Следующим шагом для выбора расходомера является точная формулировка требований к выполнению измерений, в том числе требований к точности, стоимости, надежности, монтажу, эксплуатации, обеспечению метрологических характеристик, необходимым устройством отображения информации.

Вопрос точности неизбежно является одним из первых при выборе типа расходомера. Это и не удивительно, так как измерение расхода жидкости осуществляется обычно либо в таможенных либо в коммерческих целях, либо потому, что его измерение позволяет повысить эффективность технологического процесса, дает возможность использовать автоматизацию или улучшить качество выпускаемого продукта. В некоторых случаях, например, при измерении количества сырой нефти для определения размеров пошлины, точность играет первостепенную роль, и практически нет таких путей к ее достижению, которые были бы сочтены слишком длинными.

Характерные значения точности расходомеров приведены в таблице 7, но эти цифры могут быть ухудшены неблагоприятными условиями эксплуатации. Рассмотрим, например, влияние, оказываемое вязкостью жидкости на два типа расходомеров, обладающих наибольшей точностью, а именно на камерный счетчик и турбинный расходомер. Рабочая зона и линейность характеристики турбинного расходомера уменьшается с возрастанием вязкости, в то время как у камерного счетчика увеличение вязкости оказывает прямо противоположное влияние

Таблица 7 – Характеристики расходомеров

Характеристика	Переменного перепада давления	Камерный	Вихревой	Турбинный	Постоянного перепада давления	Электромагнитный
1	2	3	4	5	6	7
Погрешность	+1% измеряемого расхода	+0.25% измеряемого расхода	+0.5% измеряемого расхода (до Re=30000)	+0.25% измеряемого расхода	+2% конца шкалы	+0.5% измеряемого расхода или +0.2% от конца шкалы (большая велич.)
Линейность	+0.5% конца шкалы	_____	_____	_____	_____	_____
Воспроизводимость результатов	_____	+(0.05÷0.02)%	+0.15%	+(0.05÷0.02)%	+1%	+0.1%
Диапазон измерения результатов	4:1	15:1	различный, но обычно 12:1	10:1	10:1, но может меняться	
Минимальная скорость потока	различная	0.3 м/сек	Re=10000	0.9 м/сек	различная	0.02 м/сек
Максимальная скорость потока	различная	4.5 м/сек	лимитируется кавитацией	лимитируется кавитацией или подшипниками	различная	20 м/сек лимитируется преобразователем

Продолжение таблицы 7

Характеристика	Переменного перепада давления	Камерный	Вихревой	Турбинный	Постоянного перепада давления	Электромагнитный
1	2	3	4	5	6	7
Потеря давления	не менее учетверенного скоростного напора	1÷1.5 скоростного напора	удвоенный скоростной напор	0.5÷1.5 скоростного напора	различная, но небольшая	отсутствует
Типоразмер	25мм и более	(25÷400)мм	(50÷150)мм	(5÷500)мм	до 50мм - стеклянная трубка до 75мм - металлическая трубка	(2÷3000)мм
Градуировка	не требуется	требуется	не требуется	требуется	не требуется	требуется
Входной сигнал	аналоговый (нелинейный)	местная или дистанционная индикация	аналоговый или частотный	частотный	местная или дистанционная индикация	аналоговый
Вторичные устройства	дифманометр	не требуется	не требуется или используется частотная электронная схема газ/жидкость	частотная электронная схема	не требуется	измерительный преобразователь
Виды среды	газ/жидкость	газ/жидкость	газ/жидкость	газ/жидкость	газ/жидкость	жидкость
Максимальная температура	300 С	150 С	120 С	300 С	100 С -масло 350 С-металл	150С -жидкость 1200С -металл
Максимальное давление	100 атм	зависит от модели	70 атм	100 атм	70атм-металл 10атм- стекло	зависит от модели

Таблица 8 - Требования к установке

Характеристики	Переменного перепада давления	Камерный	Вихревой	Турбинный	Постоянно перепада давления	Электромагнитный
1	2	3	4	5	6	7
Длина прямолинейного участка трубы: -перед расходомером -после расходомера	(15÷60)D 5D	безразлично 0	(10÷30)D в зависимости от возмущений потока 5D	10D 5D	0 0	5D 3D
Соответствие диаметру	существенно для повышения точности	не существенно	+15%	существенно	не существенно	не существенно
Источник энергии	для датчика	нет	15/30 В постоянн. тока	нет	нет	220 В перемен. ток
Фильтр	зависит от типа диафрагмы	нужен	зависит от загрязненности и жидкости	нужен	жидкость без твердых частиц	нет

Продолжение таблицы 8

Характеристика	Переменного перепада давления	Камерный	Вихревой	Турбинный	Постоянного перепада давления	Электромагнитный
1	2	3	4	5	6	7
Прочие характеристики	Нужны штуцеры, импульсные трубки, вентили. 2. Нужны газораздел. Промывка каналов отбора давления, осадительные или разделительные камеры.	Обязательно горизонтальный монтаж. Для дистанционно передающий датчик. Для крупных счетчиков нужны монтажные опоры. Монтаж крупных счетчиков очень сложен.	Прямой участок перед расходомером может быть уменьшен при использовании струевыпрямителя или в случае когда допустимо снижение точности. Простота монтажа.	Для передачи показаний на большие расстояния нужен усилитель. Рекомендуется использовать струевыпрямитель. 3. Обязательно нужны трубы небольшого диаметра	Должен устанавливаться в вертикальном положении. 2. В случае стеклянной трубки жидкость должна быть прозрачной	

На рисунке 1.8 представлено сравнение точности реальных типов расходомеров [5]. Расходомер переменного перепада давления с использованием диафрагмы не требует первоначальной градуировки.

Однако, точность такого расходомера значительно ниже. Это связано, главным образом, с квадратичной зависимостью между измеряемым перепадом давления и расходом, а также тем, что погрешность диафрагмы нормируется от конца шкалы.

Погрешность, обеспечиваемая диафрагмой с прямоугольной кромкой, находящаяся в хорошем состоянии, обычно не превышает 1% показания. Дифманометр увеличивает погрешность системы на 0.5% конца шкалы. Поэтому при максимальном расходе общая погрешность расходомера с диафрагмой равна 1.5%, ухудшаясь до 25% измеряемого расхода, когда он составляет 20% максимального.

На точность диафрагмы влияют главным образом изменения плотности жидкости. Изменение плотности на 2% вызывает изменение коэффициента расхода диафрагмы на 1%. А также износ или повреждение кромки диафрагмы. Например, затупление на 0.25мм кромки отверстия диаметром 50мм диафрагмы, установленной в магистрали диаметром 100мм, увеличивает коэффициент расхода на 2.25%.

Погрешность электромагнитного расходомера обычно определяется большим из двух значений, равных 1% фактического значения расхода и 0.2% конца шкалы. При изменении расхода в диапазоне 5:1 погрешности определяются преимущественно значением 0.2% конца шкалы. Влияние верхнего предела можно избежать путем перенастройки преобразователя для изменения масштаба шкалы. Преобразователь можно легко и быстро настроить так, чтобы максимальное значение шкалы соответствовало любому необходимому значению скорости потока в пределах от 0.02 до 20 м/сек. Поэтому электромагнитная система обладает широким рабочим диапазоном и является идеальной для применения в тех случаях, когда существуют различные, резко изменяющиеся режимы работы, характеризующиеся разным диапазоном изменения расхода, например, при дневном и ночном режимах работы предприятия или учреждения. Точность данного типа расходомера не зависит от таких параметров жидкости, как вязкость, плотность, давление, температура, но он нуждается в первоначальной градуировке.

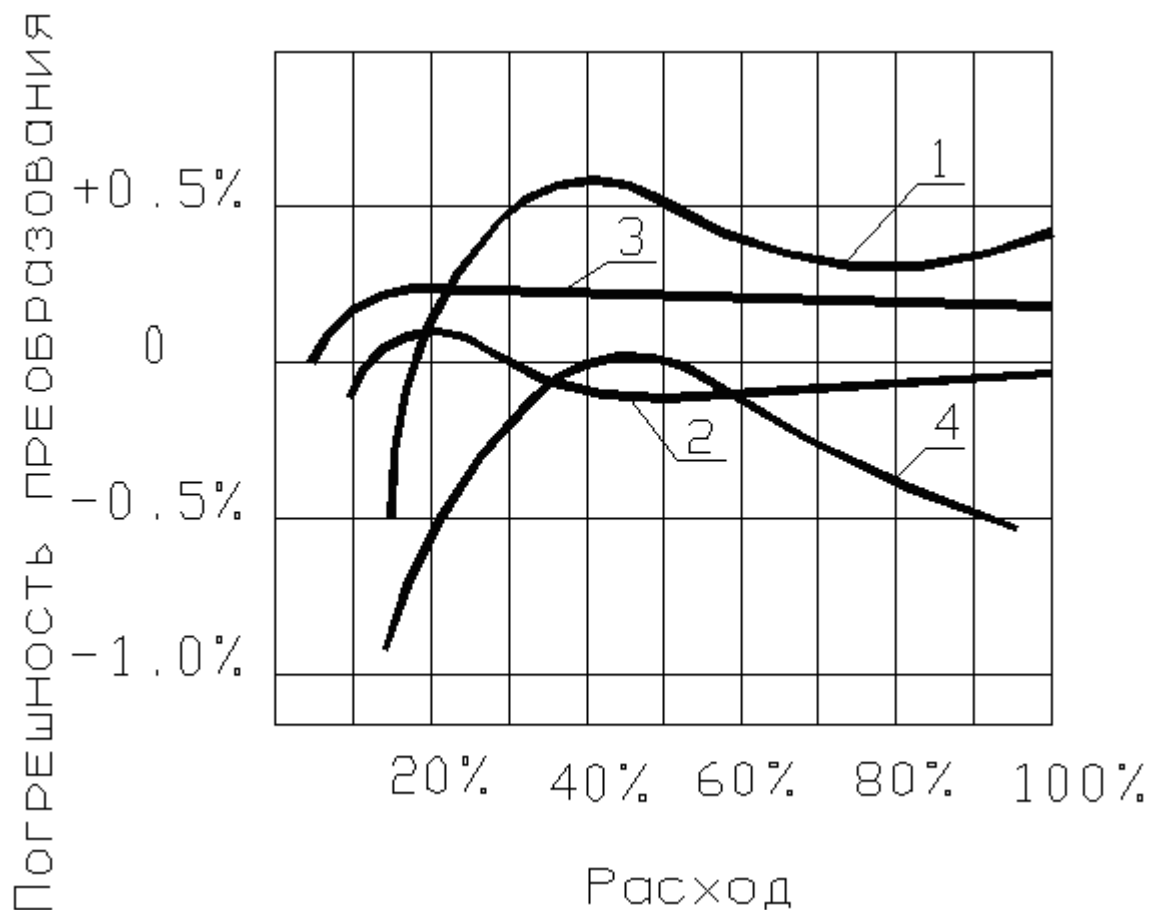


Рисунок 1.7 - Влияние вязкости на точность камерного и турбинного расходомеров: 1) турбинный расходомер при вязкости 25 Пуаз ; 2) турбинный расходомер при вязкости 0.3 Пуаз ; 3) камерный счетчик при вязкости 25 Пуаз ; 4) камерный счетчик при вязкости 0.3 Пуаз ;

Погрешность вихревого расходомера зависит от формы выходного сигнала. При частотном выходном сигнале она равна 0.5% фактического значения расхода при Re , превышающих 30000, но при аналоговом выходном сигнале частотно-аналоговый преобразователь вносит дополнительную погрешность, равную 0.2% шкалы. Погрешность вихревого расходомера с аналоговым выходом равна 0.7% конца шкалы, доходя до 1.5% при расходе, равном 20% максимального.

Градуированная характеристика вихревого расходомера может быть определена на основании геометрических параметров не обтекаемого тела и первоначальная градуировка в рабочих условиях не требуется. Частота образования вихрей зависит от размеров и формы не обтекаемого тела и диаметра трубы. При некоторых соотношениях размеров тела и трубы влияние допусков на изготовление расходомера пренебрежимо мало, и все расходомеры одного и того же типа размера имеют одинаковый коэффициент, что упрощает их взаимозаменяемость и перестройку системы. Коэффициент не зависит от вязкости, плотности, давления,

температуры, а также от вида измеряемой среды (газ или жидкость).

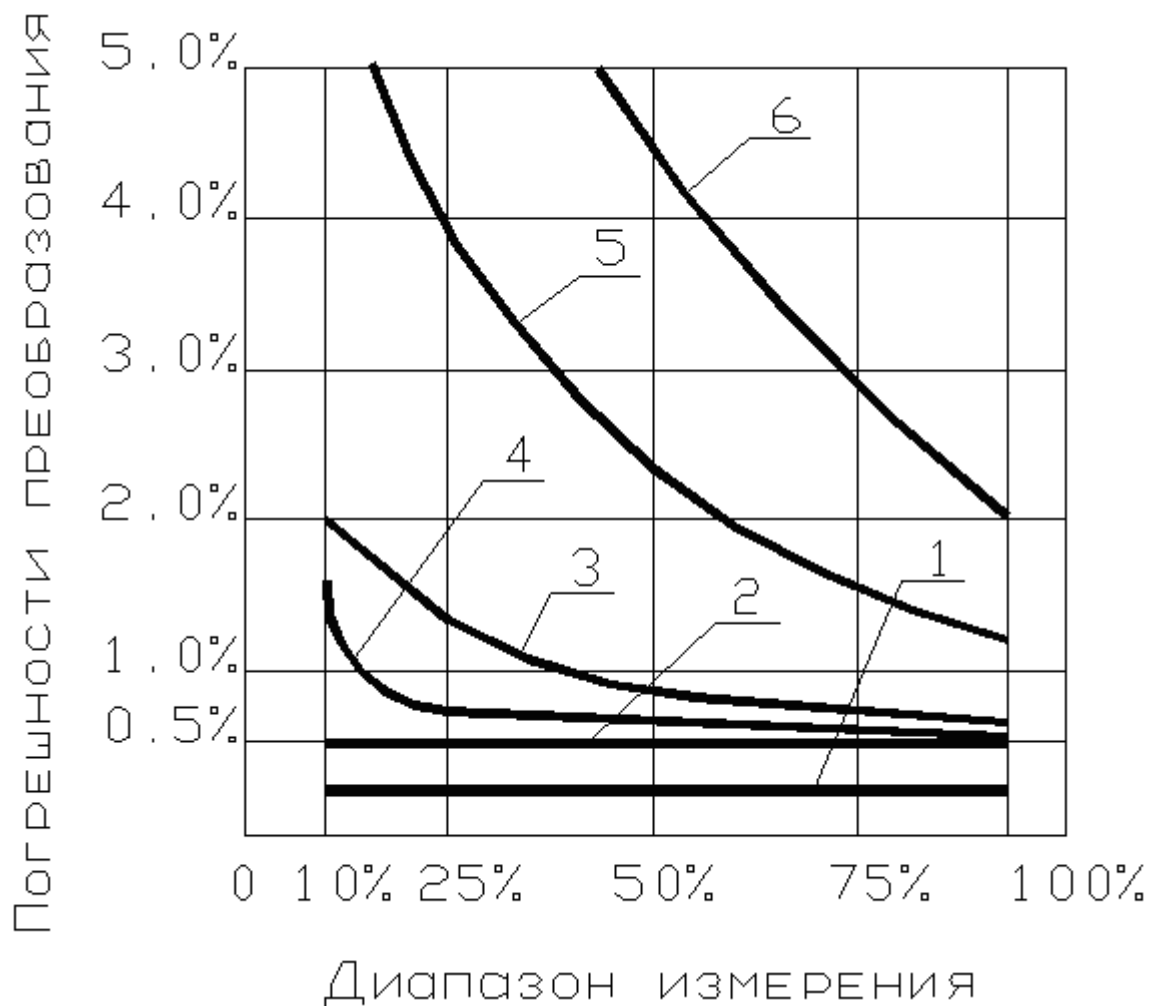


Рисунок 1.8 - Пояснение сравнительной точности различных типов расходомеров: 1) камерные и турбинные расходомеры ; 2) вихревой расходомер с частотным выходом ; 3) электромагнитный расходомер ; 4) вихревой расходомер с аналоговым выходом ; 5) расходомер переменного перепада давления ; 6) расходомер постоянного перепада давления

В применении к вихревым расходомерам неправильно говорить о динамическом диапазоне преобразования. В данном случае можно говорить об ограничениях, налагаемых не прибором, а условиями работы самой контролируемой магистрали. В данном случае ограничивающим фактором является минимальный допустимый расход, определяемый, обычно, значением тела $Re = 10000$. Верхний предел определяется максимальным значением расхода, которое возможно создать в магистрали, так как максимальная скорость потока для вихревого расходомера равна 50м/сек. Максимальный расход может ограничиваться потерей давления, кавитацией (в случае жидкости) или расширяемостью (в случае газов). При работе с жидкостями диапазон преобразования расхода составляет 15:1, для газов, вследствие более высоких скоростей диапазон достигает 40:1.

2 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ. СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Согласно [3] под электромагнитным расходомером понимается такой расходомер, принцип действия которого основан на зависимости взаимодействия движущейся жидкости с магнитным полем от объемного расхода.

Выходное напряжение электромагнитного датчика описывается следующим выражением:

$$E = B v d, \quad (1.1)$$

где

E - напряжение, снимаемое с электродов;

B - индукция магнитного поля в жидкости;

v - средняя скорость потока в сечении, проходящем через ось электродов;

d - диаметр проходного отверстия (расстояние между электродами).

2.1. История развития электромагнитного принципа измерения расхода

В 1832г. М.Фарадей провел опыты по измерению скорости течения воды Темзы, используя закон электромагнитной индукции. С моста Ватерлоо он опустил в Темзу металлические электроды и попытался измерить электрическое напряжение, которое должно было возникнуть между ними, благодаря движению воды относительно магнитного поля Земли. Однако данная попытка не увенчалась успехом, поскольку различные напряжения помех значительно превысили полезный сигнал [6].

В 1917г. Смит и Слепиан предложили использовать этот принцип для измерения скорости корабля. Предполагалось измерять напряжение, наводимое между двумя электродами, благодаря движению воды относительно корабля при наличии магнитного поля. Однако их опыты по тем же причинам, что и опыты Фарадея не дали положительных результатов.

Экспериментами Юнга, Джерарда и Джевонса в 1918г. в порту Дортмунд было показано, что под влиянием магнитного поля Земли и движения воды во время приливов и отливов возникает периодическое напряжение, длительность периода которого совпадает с продолжительностью приливов и отливов. Однако, в силу различных помех измеренное напряжение было не воспроизводимо и не могло быть использовано как показатель скорости течения.

Первые экспериментальные доказательства возможности измерения скорости

жидкости электромагнитным методом в крайне ограниченных условиях удалось получить Вильяму в 1930г. Он использовал раствор сульфата меди и медные электроды в закрытом трубопроводе, по которому протекал раствор. Благодаря такому решению удалось сделать очень малыми несимметричные и поляризационные напряжения.

В лабораторных условиях Вильяму удалось доказать линейную зависимость индуцированного напряжения от скорости потока. Кроме того, он широко исследовал эту зависимость математически. Он доказал, что благодаря движению жидкости и имеющемуся постоянному полю возникает полезный сигнал, на который накладывается “контактное” напряжение. Последний имеет значительную величину, однако остается постоянным в течении короткого промежутка времени, за который проводится эксперимент. В следствии этого измерение вообще возможно. Этот “контактный” потенциал для жидких металлов (ртути) пренебрежимо мал, однако, в данном случае проявляется наибольшее изменение расхода из-за действия вихревых токов, индуцированных в жидком металле.

Несколькими годами позднее некоторые физиологи использовали электромагнитный принцип для измерения скорости крови в кровеносных сосудах зверей.

Почти одновременно (1936г) независимо друг от друга приступили к решению этой проблемы Фабр, Ветгерер и Колин.

Колин первым применил переменное синусоидальной формы магнитное поле и этим смог исключить несимметричное напряжение помехи. Но при этом появились другие трудности, поскольку в выходном напряжении появилась трансформаторная составляющая напряжения.

Для проводящих жидкостей, однако, трансформаторная составляющая помехи сдвинута относительно полезной составляющей на 90 и может быть исключена при помощи компенсации. Колин развивал свои предположения вплоть до 1956г.

В обширных теоретических работах Тюрмман в 1941г. Математически показал, что в трубе с круглым сечением, напряжение, наведенное магнитным полем, пропорционально средней скорости текущей в трубе жидкости. Этот вывод справедлив независимо от профиля скоростей потока, при условии, что он асимметричен. Данное обстоятельство ставит данный тип расходомера в разряд одного из самых перспективных приборов.

С начала 50-х годов различные американские и европейские фирмы, а с 1962г. предприятия СССР изготавливают электромагнитные расходомеры, в которых используется переменное магнитное поле синусоидальной формы.

Из-за больших трудностей при измерении, несмотря на интенсивные усилия, от первых опытов Фарадея до практического промышленного применения этого метода измерения расхода прошло 120 лет.

Миттельман и Кашинг (1952-1959гг.) а также Энтл (1961г.) математически исследовали возможность применения электромагнитных расходомеров для проводящих и непроводящих жидкостей. При этом они установили линейную зависимость напряжения от расхода для непроводящих жидкостей. Однако, они не делают никаких высказываний о составе этого напряжения.

После первых исследований Элрода и Фауса по применению электромагнитных расходомеров для определения скорости жидких металлов в 1959г. они нашли применение в атомных реакторах, где жидкий металл служит охладителем.

В 1955 и 1962 гг. Шерклиф ввел понятие весовой функции, отражающей относительный вклад в сигнал определенных точек потока, проводящего через поперечное сечение трубы в плоскости электродов.

С 1965г. промышленные фирмы стали выпускать расходомеры с неоднородным магнитным полем такой формы, что произведение значений весовой функции в каждой точке поперечного сечения имеют постоянное значение. В данном случае измерение потока, даже с очень сильной не симметрией профиля скоростей дает правильные результаты. Реализация данного положения может быть практически только приближительной, т.к. для точного создания неоднородного магнитного поля обмотки должны иметь седлообразную форму и облегать трубу в плоскости электродов.

Благодаря такому неоднородному полю удается существенно сократить длину датчика.

В последнее десятилетие появились расходомеры с прямоугольным каналом, в котором противоположные стороны выполняют роль электродов, при этом в однородном магнитном поле профиль скоростей вообще не влияет на точность преобразования.

При совершенствовании расходомеров данного типа основные усилия разработчиков направлены на повышение чувствительности и устойчивости измерительного преобразователя. В связи с этим представляется целесообразным и поучительным рассмотреть измерительные цепи современных электромагнитных расходомеров.

2.2 Эквивалентная схема замещения электромагнитного датчика расхода. Влияние помех общего и нормального видов

Эквивалентную схему замещения электромагнитного датчика расхода можно представить так, как это показано на рис. 2.1, где приняты следующие обозначения :

Епол - полезная составляющая выходного напряжения, т.е. между электродами 1 и 2, пропорциональное расходу, определяемое в соответствии с

формулой (1.1);

$E_{\text{э}1}, E_{\text{э}2}$ -электрохимическое напряжение соответствующих электродов;

$R_{\text{вн}}$ - внутреннее сопротивление среды относительно точек расположения электродов;

$r_{\text{ср}1}, r_{\text{ср}2}$ - сопротивление среды между точками заземления датчика (фланцами) и соответствующими электродами;

$C_{\text{пар}1}, C_{\text{пар}2}$ - паразитные емкости между электродами и заземленным корпусом датчика;

$C_{\text{из}1}, C_{\text{из}2}$ - паразитные емкости между индуктором и электродами;

$R_{\text{из}1}, R_{\text{из}2}$ - сопротивления изоляции между индуктором и соответствующими электродами;

ИН - индуктор катушка индуктивности совместно с магнитопроводом, создающее магнитное поле в измеряемом пространстве;

$E_{\text{ин}}$ - напряжение питания индуктора.

Полезное напряжение, пропорциональное расходу $E_{\text{пол}}$, находится на уровне единиц мВ и подчиняется выражению (1.1). Электрохимическое напряжение $E_{\text{э}}$ носит характер медленного дрейфа с частотами ($10^{-3} \div 10^{-1}$)Гц, а эквивалентное напряжение, перемноженное между электродами ($E_{\text{э}1} - E_{\text{э}2}$) может находиться в интервале (0.1 - 200) мВ [7]. Внутреннее сопротивление среды может доходить до значений в несколько Мом, сопротивление среды $r_{\text{ср}}$ между точками заземления датчика (или измеряемого раствора) находится на том же уровне, что и $R_{\text{вн}}$. Паразитные емкости $C_{\text{пар}1,2}$ и $C_{\text{из}1,2}$ находятся в пределах (100 - 300)пф. Сопротивление изоляции между электродами и заземленным корпусом сухого датчика находится в пределах сотен Мом, на этом же уровне находятся сопротивления $R_{\text{из}1}, R_{\text{из}2}$.

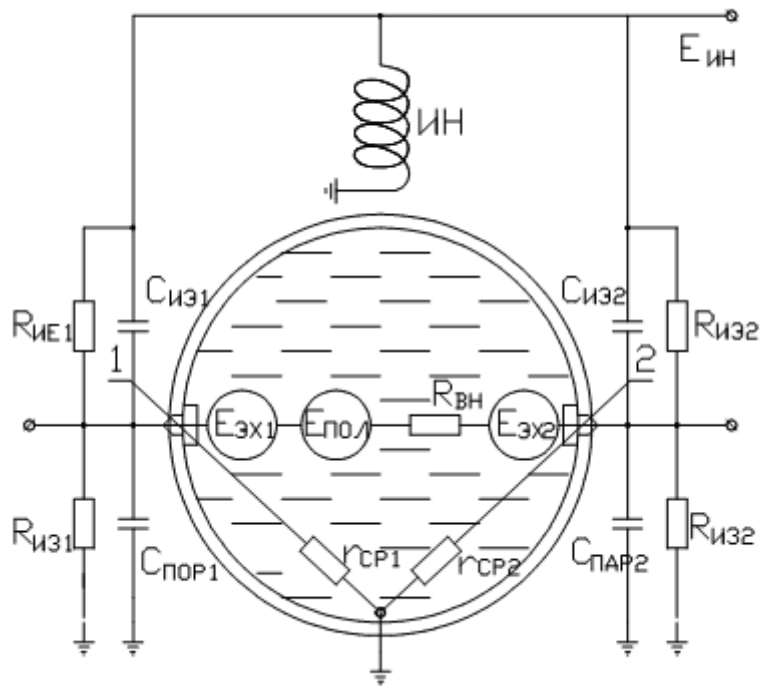


Рисунок 2.1 - Физическая модель датчика с представлением элементов эквивалентной схемы замещения.

Как видно из рисунка 2.1 сопротивления изоляции электродов относительно точки заземления (корпуса датчика) $R_{из1}$, $R_{из2}$ и соответствующие сопротивления среды $\gamma_{ср1}$, $\gamma_{ср2}$ включены параллельно. А поскольку $R_{из} \gg \gamma_{ср}$, то основное значение будет оказывать $\gamma_{ср}$.

При подсоединении измерительного преобразователя к электромагнитному датчику эквивалентную схему замещения можно представить так, как на рисунке 2.2, где приняты следующие обозначения:

ИП - измерительный преобразователь;

U_z - напряжение между корпусом измерительного преобразователя (из условий техники безопасности корпус подлежит обязательному заземлению) и точкой заземления датчика;

$R_{вх}$ - входное дифференциальное сопротивление ИП;

$R_{вхс1}, R_{вхс2}$ - входные синфазные сопротивления по соответствующим входам;

$E_{эx} = E_{эx1} - E_{эx2}$ - суммарная э.д.с. двух электрохимических потенциалов.

Для определения конкретной связи между индуктором, питаемым от источника $E_{ин}$ и электродами необходимо знать более подробно схему построения измерительного преобразователя. Следует помнить, что поскольку линия связи, связывающая электроды со входами ИП проходит через линии магнитного поля, последние возбуждают в ней э.д.с., особенно ощутимую при питании индуктора переменным синусоидальным напряжением. В настоящее время имеются

расходомеры с различными видами магнитного поля, создаваемого в зазоре датчика. В связи с этим целесообразно остановиться на способах питания более подробно.

2.3 Способы питания электромагнитного датчика

По характеру магнитного поля, возбуждаемого в измеряемой среде, датчики можно разделить на классы, представленные на рисунке 2.3. Электромагнитные датчики, работающие с постоянным магнитным полем, являются наиболее простыми с точки зрения создания магнитного поля, однако, область их применения ограничивается только измерением расхода жидкого металла (как правило в контурах охлаждения атомных реакторов). В данных случаях применения электрохимические потенциалы практически отсутствуют и, кроме того, поскольку измеряемая среда является прекрасным проводником, то использование других видов магнитного поля просто недопустимо из-за создания вихревых токов в среде и нарушением осе симметричности потока.

Наибольшее распространение получили расходомеры с переменным магнитным полем. До недавнего времени широко распространены были расходомеры с синусоидальным магнитным полем, создаваемым напряжением промышленной сети (50Гц). Это расходомеры типа ИР (ИР-61, ИР-51, ИР-45) производства Таллиннского завода Промприбор. Известны расходомеры с питанием асинусоидальным напряжением частотой 25Гц [8,9]. Однако, данным расходомерам наряду повышенной чувствительностью, полезный сигнал усиливается в узкой полосе частот, свойственно значительное потребление энергии. Например, расходомер типа ИР-61 потребляет 200-300Вт для питания индуктора. Кроме того подобный способ питания допускает использование так называемых скрытых электродов, т.е. таких электродов, которые не имеют гальванического контакта с измеряемой средой. Снятие потенциала осуществляется через слой диэлектрика (футеровки). При других видах магнитного поля данный вариант исполнения крайне затруднителен [10].

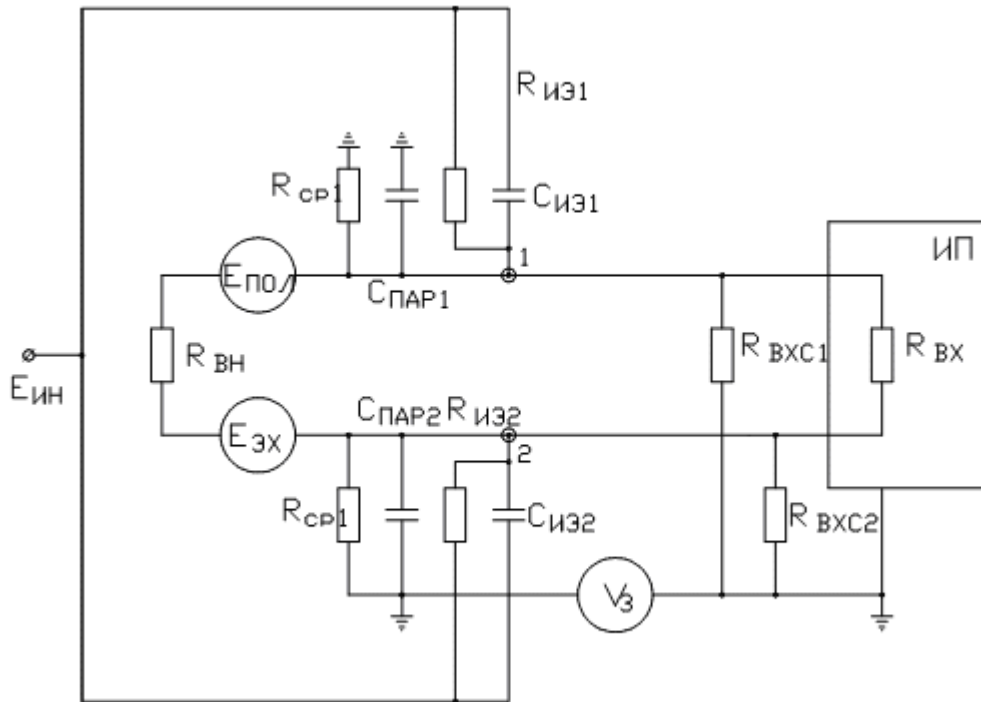


Рисунок 2.2 - Эквивалентная схема замещения электромагнитного датчика и измерительного преобразователя.

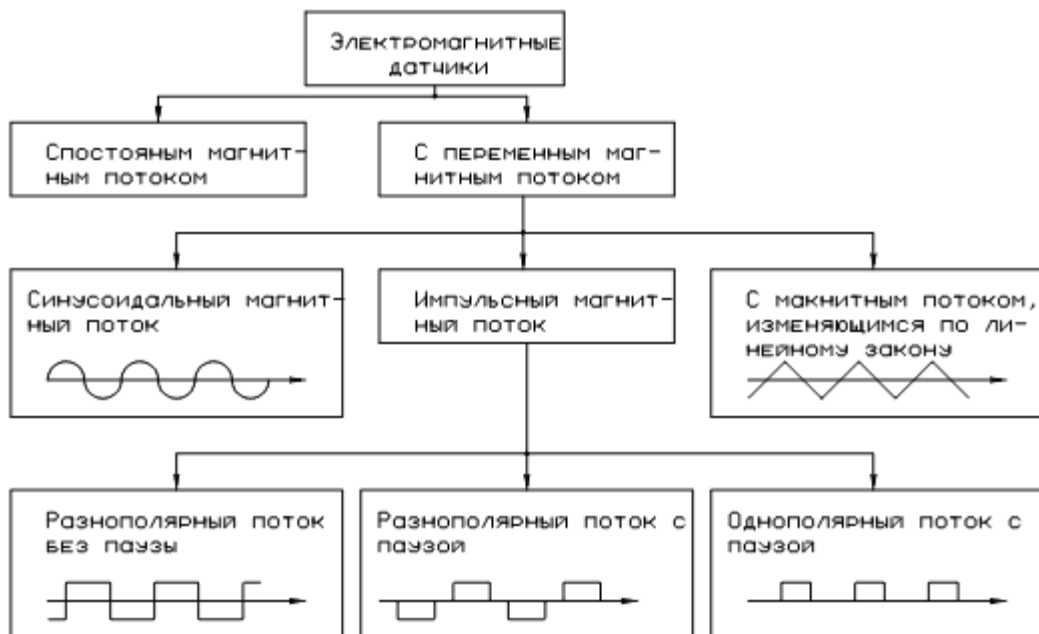


Рисунок 2.3 - Классификация электромагнитных датчиков расхода по типу создаваемого магнитного потока.

Известны расходомеры с магнитным полем, изменяющимся по линейному закону с чередованием знака производной [10], при этом оказывается возможным довольно простого отстранения от влияния электрохимического потенциала.

В последнее время значительное распространение получили расходомеры с прерывающим магнитным полем (см.рис. 2.3).

В связи с бурным развитием цифровой техники и программной обработки выходных сигналов первичных датчиков данные виды расходомеров получили широкое распространение. Это расходомеры типа ИПРЭ, РОСТ и др. При таком виде магнитного поля появляются определенные преимущества, заключаемые в более эффективном использовании энергии, используемой для создания магнитного поля. Достаточно сказать, что в этом случае потребляемая мощность составляет не сотни, а десятки (и даже единицы) Вт. Кроме того, имеется возможность довольно просто избавляться от влияния электрохимической э.д.с.

Ниже будут рассмотрены более подробно различные способы питания электромагнитных датчиков и соответствующие измерительные цепи.

2.4 Обзор способов построения измерительных цепей для электромагнитных датчиков расхода

Используя эквивалентную схему замещения, представленную на рисунке 2.2, можно найти общие ограничения, накладываемые на измерительную цепь. Однако, для этого необходимо определиться какой формы создается линейное поле и каким образом подключен источник напряжения, используемый для питания индуктора.

Для случая, когда магнитное поле носит синусоидальный характер и имеет частоту сети, напряжение на индуктор подается от силовых проводов.

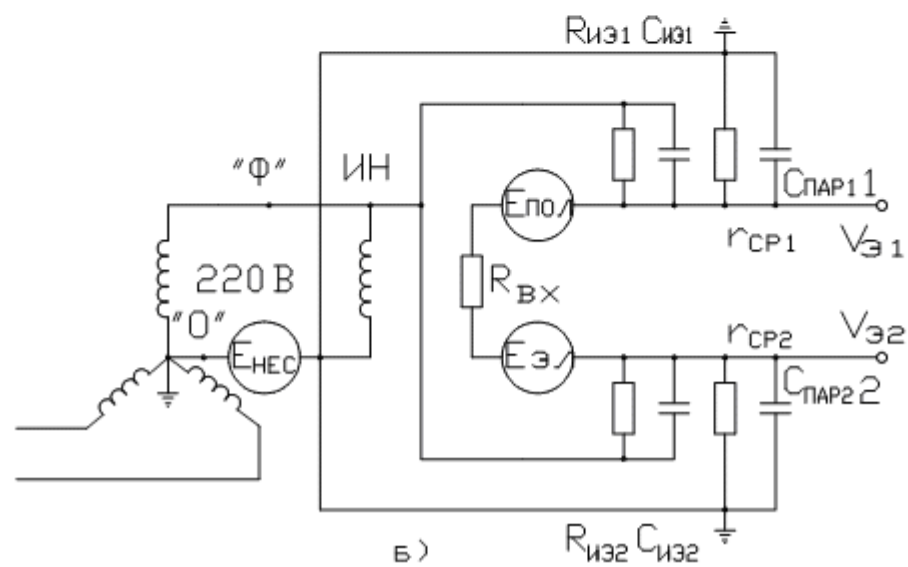
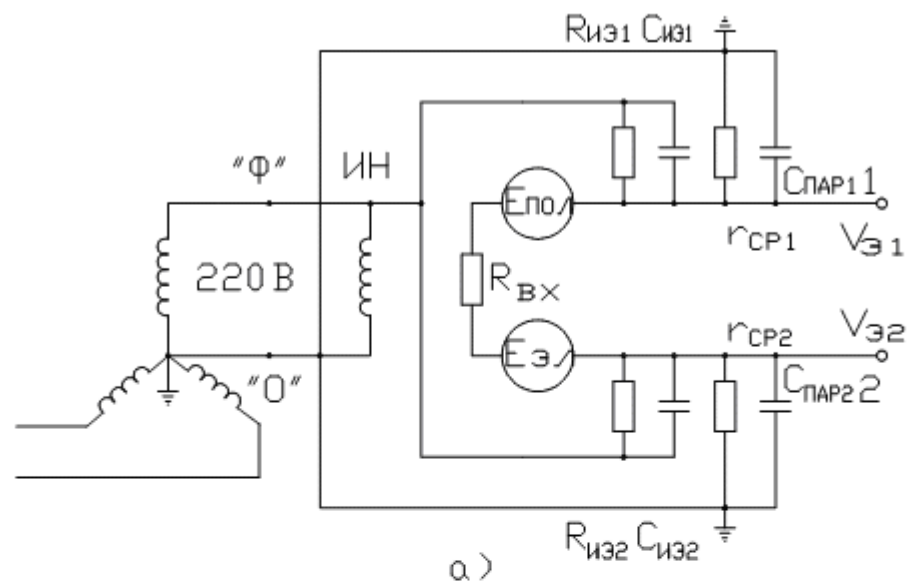


Рисунок 2.4 - Эквивалентная схема замещения электромагнитного датчика при питании индуктора (ИН) от четырехпроводной силовой линии, где а) симметричная нагрузка линии питания ; б) несимметричная нагрузка, характеризующаяся напряжением между точками заземления $E_{НЕС}$, I_1, I_2 - токи, создающие синфазные напряжения на электродах $V_{Э1}, V_{Э2}$.

При этом имеется провод с нулевым потенциалом и провод с потенциалом 220В (“ноль” и “фаза”). Эквивалентная схема заземления для данного случая представлена на рисунке 2.4а. Следует отметить, что, как правило, электроснабжение промышленных и гражданских объектов осуществляется по четырех проводной линии питания, где один из проводов (нулевой) оказывается заземленным. Из рисунка 2.4 видно, что при одинаковых значениях паразитных емкостей $C_{\text{пар}1}=C_{\text{пар}2}$ и соответствующих сопротивлений $r_{\text{ср}1}=r_{\text{ср}2}$, а также при соблюдении равенства $C_{\text{нэ}1}=C_{\text{нэ}2}$ и $R_{\text{нэ}1}=R_{\text{нэ}2}$. Паразитные связи обмотки возбуждения и электродов не приведут к появлению между электродами дополнительного напряжения, подаваемого на вход усилителя электронного преобразователя. Даже нарушение симметрии фаз питающей силовой линии (см. рис. 2.4б), приводящее к тому, что второй конец обмотки возбуждения индуктора окажется подключенным к источнику напряжения, не влияющему на разницу напряжений между электродами. Из эквивалентной схемы видно, что симметрия протекания паразитных токов также не нарушится.

Однако, паразитные параметры приводят к появлению на электродах синфазной составляющей, значение которой в значительной степени определяется сопротивлениями сред: $r_{\text{ср}1}$, $r_{\text{ср}2}$. Чем они выше, тем выше уровень синфазной составляющей. Например, при питании индуктора напряжением 220В (как это принято в датчиках типа ИР-51, ИР-61) и следующих значениях паразитных составляющих: $C_{\text{иэ}1}=C_{\text{иэ}2}=20\text{пФ}$; $C_{\text{пар}1}=C_{\text{пар}2}=20\text{пФ}$; $R_{\text{иэ}1}=R_{\text{иэ}2}=10\text{Мом}$ и сопротивление среды $r_{\text{ср}1}=r_{\text{ср}2}=1\text{Мом}$. Уровень синфазной составляющей будет равен:

$$\varepsilon_1 = \frac{E_{\text{num}} \cdot C_{\text{пар}1} \| r_{\text{ср}1}}{Z_{\text{иэ}1} \| R_{\text{иэ}1} + r_{\text{ср}1} \| C_{\text{пар}1}}$$

аналогичное выражение получается и для второго электрода:

$$\varepsilon_2 = \frac{E_{\text{num}} \cdot C_{\text{пар}2} \| r_{\text{ср}2}}{Z_{\text{иэ}2} \| R_{\text{иэ}2} + r_{\text{ср}2} \| C_{\text{пар}2}}$$

При питании напряжением частотой 50Гц указанные выражения с учетом того, что $Z_{\text{пар}} = Z_{\text{иэ}} = 150\text{Мом}$ и $r_{\text{ср}} = 1\text{Мом}$, имеют вид:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{num}} \cdot r_{\text{ср}}}{Z_{\text{иэ}1} \| R_{\text{иэ}}} = \frac{E_{\text{num}} \cdot r_{\text{ср}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_{\text{иэ}}}\right)^2 + R_{\text{иэ}}^2}}$$

или

$$\varepsilon = \frac{220B \cdot 1.2M_{\text{ом}}}{\sqrt{150^2 M_{\text{ом}} + 100^2 M_{\text{ом}}}} = 1.2B$$

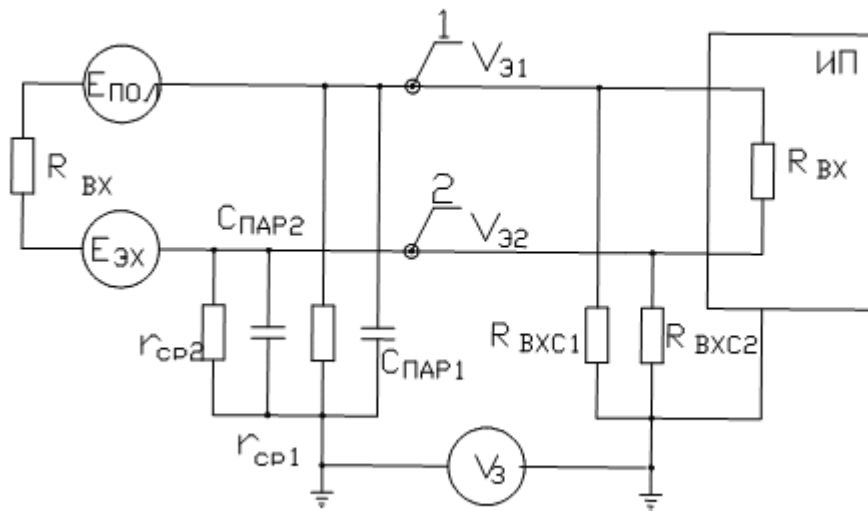
При сопротивлении среды $r_{\text{cp}} = 10M_{\text{ом}}$, напряжение U_{ε} будет соответственно в 10 раз выше, т.е. 12В. Таким образом, при измерении расхода сред с высоким сопротивлением, необходимо добиваться приемлемых результатов по уровню синфазной составляющей, которая может насытить входной усилитель измерительного преобразователя. Из эквивалентной схемы видно, что снижать уровень синфазной составляющей возможно только путем уменьшения паразитных емкостей между индуктором и электродами при одновременном увеличении соответствующего сопротивления изоляции.

Из сказанного следует еще один важный для практического применения вывод. Дело в том, что при разнице в сопротивлениях между электродами и корпусом датчика (эквивалентных сопротивлениям среды) $r_{\text{cp1}} = r_{\text{cp2}}$, между электродами появится напряжение, пропорциональное этой разнице, которое не отличимо от полезного напряжения. В результате выходной сигнал датчика исказится. Данное явление возможно в случае, если, например электроды “зарастают” в разной степени, например, когда один электрод расположен сверху, а другой - внизу. Такого расположения датчика недопустимо. Электроды должны располагаться вдоль оси, параллельной горизонту.

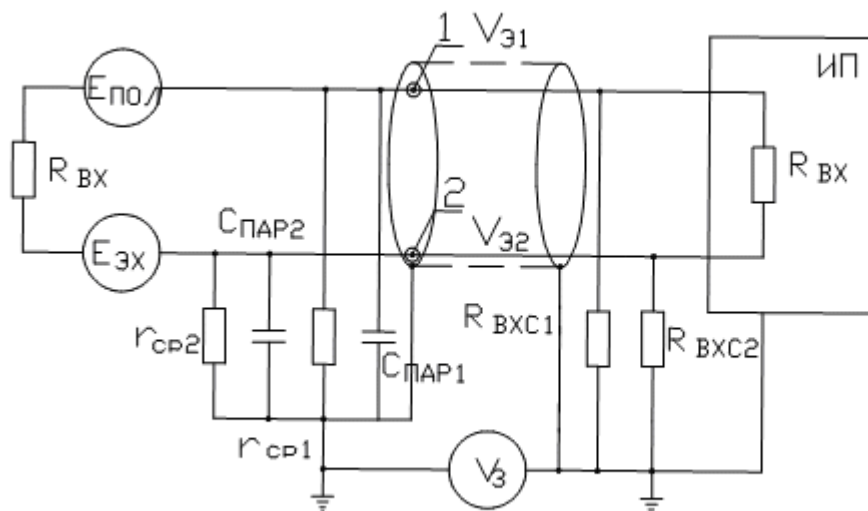
Указанные выше соображения налагают определенные требования, предъявляемые к входному усилителю. К этим требованиям относятся следующие:

- 1) входной усилитель должен быть с симметричным входом;
- 2) входные сопротивления усилителя по синфазной составляющей должны быть много меньше сопротивления среды ($r_{\text{вх синф}} \ll r_{\text{cp}}$);
входное дифференциальное сопротивление должно быть много больше внутреннего сопротивления датчика ($R_{\text{вх диф}} \gg R_{\text{вн}}$).

Согласно эквивалентной схеме, представленной на рис. 2.2 к синфазному напряжению, создаваемому за счет питания индуктора, в реальных условиях эксплуатации может добавиться напряжение между точками заземления измерительного преобразователя и корпуса электромагнитного датчика $U_{\text{з}}$. Данное напряжение может иметь значение, достигающее единиц и даже десятков вольт. В связи с этим желательно корпус датчика отдельным приводом соединять с корпусом измерительного преобразователя, создавая тем самым путь для протекания тока $i_{\text{з}}$, вызванного наличием напряжения $u_{\text{з}}$ (см.рис. 2.5 а, б).



а)



б)

Рисунок 2.5 - Эквивалентная схема: а) поясняющая влияние напряжения между точками заземления измерительного преобразователя и датчика V_3 на образование напряжений $V_{э1}, V_{э2}$; б) способ снижения влияния этого напряжения

2.4.1 Магнитная связь между индуктором и измерительной цепью

При создании магнитного потока, пронизывающего плоскость в которой расположены электроды, возникает магнитная связь между индуктором и контуром, образованным внутренним сопротивлением среды и линией связи со входным усилителем измерительного преобразователя. В данном случае в этом контуре образуется трансформаторная э.д.с., которая на 90 сдвинута относительно полезного сигнала. Эквивалентная схема для данного случая представлена на рис. 2.6.

На рис. 2.6 приняты следующие обозначения:

Φ - магнитный поток, создаваемый индуктором;

E_{tr} - трансформаторная э.д.с., наводящаяся во входном контуре измерительной цепи.

В последних моделях датчиков контур конструктивно располагают так, как показано на рис. 2.6б, т.е. плоскости контура располагают параллельно магнитным силовым линиям, чем существенно уменьшают значение трансформаторной э.д.с.

Кроме того используют и схемные решения для компенсации трансформаторной э.д.с., например, так, как это представлено на рис. 2.8. Данный способ компенсации использован в серийном расходомере типа ИР-61, ИР-51, ИР-45. Сущность данного способа заключается в том, что контур, образованный выше описанными проводниками, в котором наводится трансформаторная э.д.с. разбивается на два симметричных, таким образом, чтобы их эффективные площади были одинаковыми. При этом суммарная э.д.с. контуров равняется нулю, поскольку данные э.д.с. включены встречно.

Регулировочный резистор служит для симметрирования э.д.с. Потенциал, снимаемый с точки равен:

$$E_a = \frac{E_{mp1} \cdot R_n}{R_1} - \frac{E_{mp2} \cdot R_n}{R_2},$$

где

$$R_n = R_1 \parallel R_2.$$

Таким образом, если E_{tr1} E_{tr2} , то путем изменения соотношения между резисторами можно добиться такого положения, что напряжение E_a будет равно нулевому значению.

Естественно, что при питании индуктора постоянным и импульсным током с различными комбинациями пауз и длительностей трансформаторная э.д.с. будет

оказываться в интервале времени, когда есть изменение потока ($d\Phi/dt = 0$). Данные интервалы детерминированы и, как правило, с помощью управляющей схемы исключаются из рассмотрения при формировании полезного сигнала.

Следует отметить, что непосредственно электромагнитный датчик находится в зоне максимального воздействия температуры измеряемой среды, которая, например, при измерении тепловых потоков может достигать 150 С. При этом существенным образом изменяется активное сопротивление меди (более чем на 60%), что ведет, в случае питания индуктора от источников э.д.с., к изменению магнитного потока, т.е. чувствительности датчика.

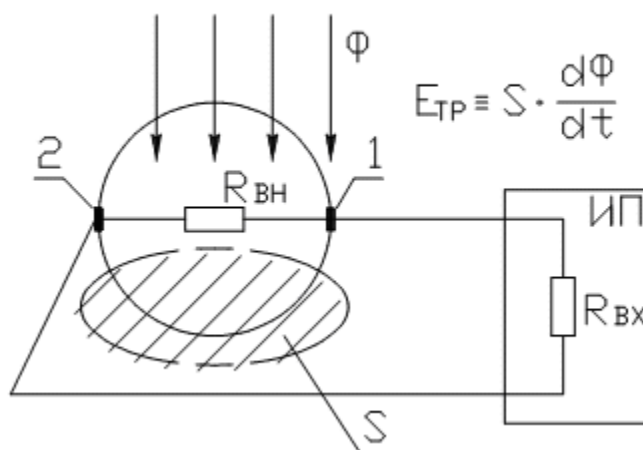


Рисунок 2.6 – Образование трансформаторной э.д.с: S – эквивалентная площадь контура, Φ – магнитный поток

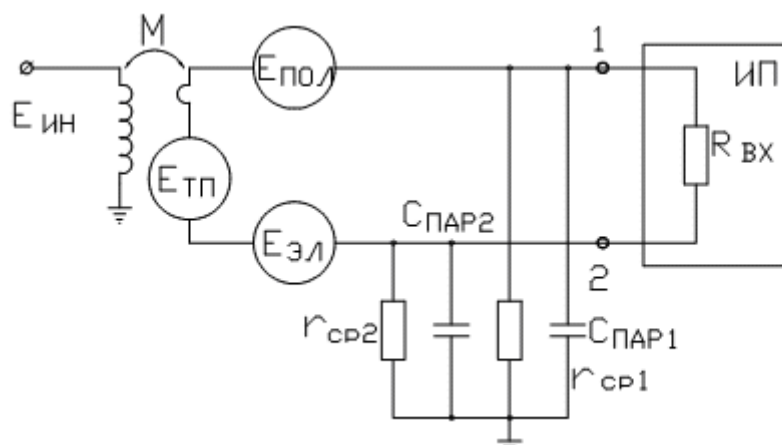


Рисунок 2.7 - Эквивалентная схема замещения электромагнитного датчика с учетом магнитной связи M

Кроме того, изменяются и параметры магнитопровода (в частности потери на перемагничивание сердечника). Указанные обстоятельства необходимо учитывать при создании измерительных схем для электромагнитного датчика расхода.

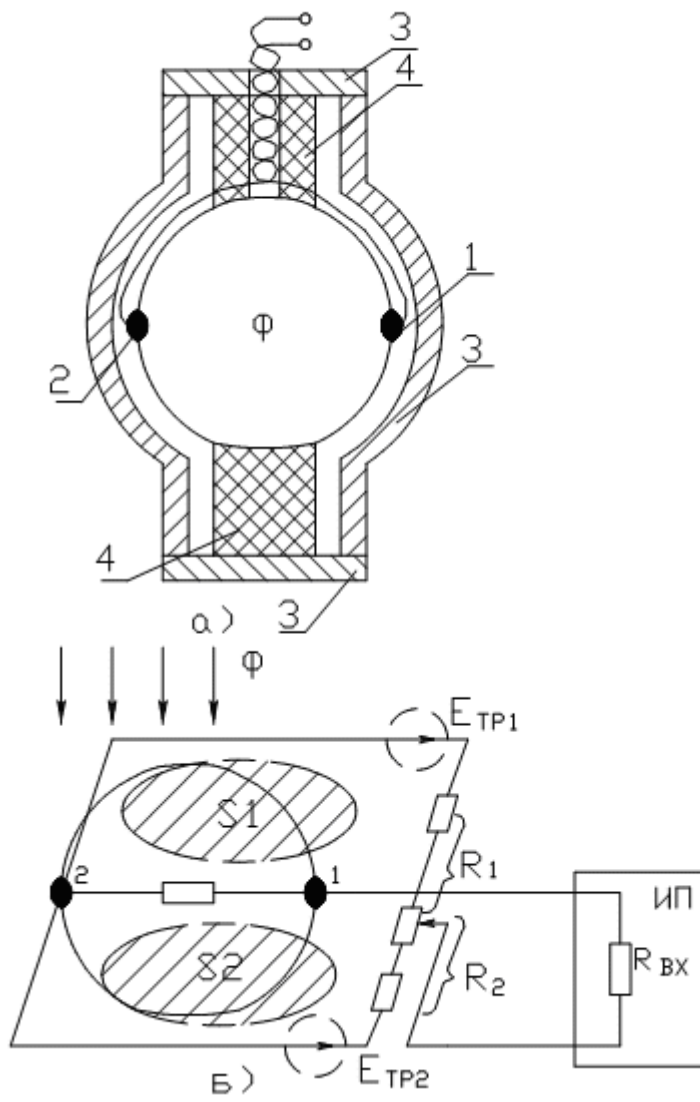


Рисунок 2.8 - Способы снятия влияния трансформаторной ЭДС тр .
 а) путем расположения плоскости контура параллельно потоку Φ ; б) путем образования двух одинаковых контуров с последующим суммированием.

2.4.2 Измерительные цепи для датчика с синусоидальным магнитным полем

Наиболее просто организовать магнитное поле синусоидальной формы с частотой, равной частоте сети. Для этого достаточно подать соответствующее напряжение на индуктор. Однако, при этом на входе датчика будет присутствовать, кроме электрохимической э.д.с. напряжение трансформаторной э.д.с., напряжение, совпадающее по фазе с полезным сигналом и полезная составляющая. Возникает вопрос, каким образом селективировать данные напряжения? Как правило, различают где полезный сигнал, а где трансформаторная э.д.с., привязываясь к магнитному потоку Φ . С этой целью на магнитопроводе индуктора располагают еще одну обмотку, напряжение которой используют в качестве опорного и, кроме того, в качестве сигнала, несущего информацию об индукции магнитного поля датчика.

Эквивалентная схема индуктора представлена на рис. 2.9а, где приняты следующие обозначения:

$E_{\text{пит}}$ - напряжение питания индуктора;

R_m - омическое сопротивление обмотки возбуждения (сопротивление “меди”);

R_p - эквивалентное сопротивление потерь в стали, вызванных вихревыми потоками, гистерезисом и дополнительными потерями (на вязкость и др);

L - индуктивность обмотки возбуждения индуктора;

I_i - ток индуктора;

I_L - ток индуктивности L , создающий магнитный поток Φ ;

I_p - ток потерь в стали;

$U_{\text{ав}}$ - напряжение на индукторе, при условии, что $R_m=0$.

Векторная диаграмма, поясняющая фазовые и амплитудные соотношения между токами и напряжениями эквивалентной схемы представлена на рис. 2.9б. Для данной диаграммы верны следующие соотношения:

$$E_{\text{пит}} = U_{\text{ав}} + I_i R_m;$$

$$I_i = I_L + I_p;$$

$$U_{\text{ав}} = j\omega L \cdot I_L;$$

$$U_{\text{ав}} = I_p R_p.$$

Как видно из векторной диаграммы ток I_L , создающий поток Φ , не совпадает с током индуктора I_i , а степень несовпадения определяется током потерь I_p . Если потери в стали отсутствуют ($R_p=0$, $I_p = 0$), то ток $I_L(\Phi)$ совпадает с током индуктора. Естественно данная ситуация может быть только при постоянном или

крайне медленно изменяющемся напряжении питания Епит. Однако, при питании индуктора переменным напряжением сетевой частоты потери всегда присутствуют. И, кроме того, потери в стали существенно изменяются при изменении температуры индуктора (температуры измеряемой среды, находящийся в типовом контакте с индуктором). Из изложенного ясно, что сигнал, необходимый для селекции полезной составляющей на фоне трансформаторной э.д.с., необходимо формировать привязываясь к току I_L или потоку Φ . Для указанной цели служит дополнительная обмотка $w_{оп}$, расположенная на индукторе. Напряжение на этой обмотке $U_{оп}$ имеет вид:

$$U_{оп} = J\omega w_{оп} \Phi = J\omega w_{оп} K I_L,$$

где

K - коэффициент пропорциональности, учитывающий конструктивные данные обмотки.

Из полученного выражения видно, что $U_{оп}$ сдвинуто относительно тока I_L на 90 градусов. Трансформаторная э.д.с. $U_{тр}$ в выходном сигнале датчика будет совпадать с напряжением на обмотке $w_{оп}$. В сущности, измеряемая среда, электроды и измерительная цепь создают обмотку, аналогичную обмотке $w_{оп}$, расположенную только не на магнитопроводе, а в зазоре индуктора. Векторная диаграмма, поясняющая расположение трансформаторной э.д.с. $U_{тр}$ и полезной составляющей $U_{пол}$ относительно тока I_L (или потока Φ), представлена на рис. 2.9в.

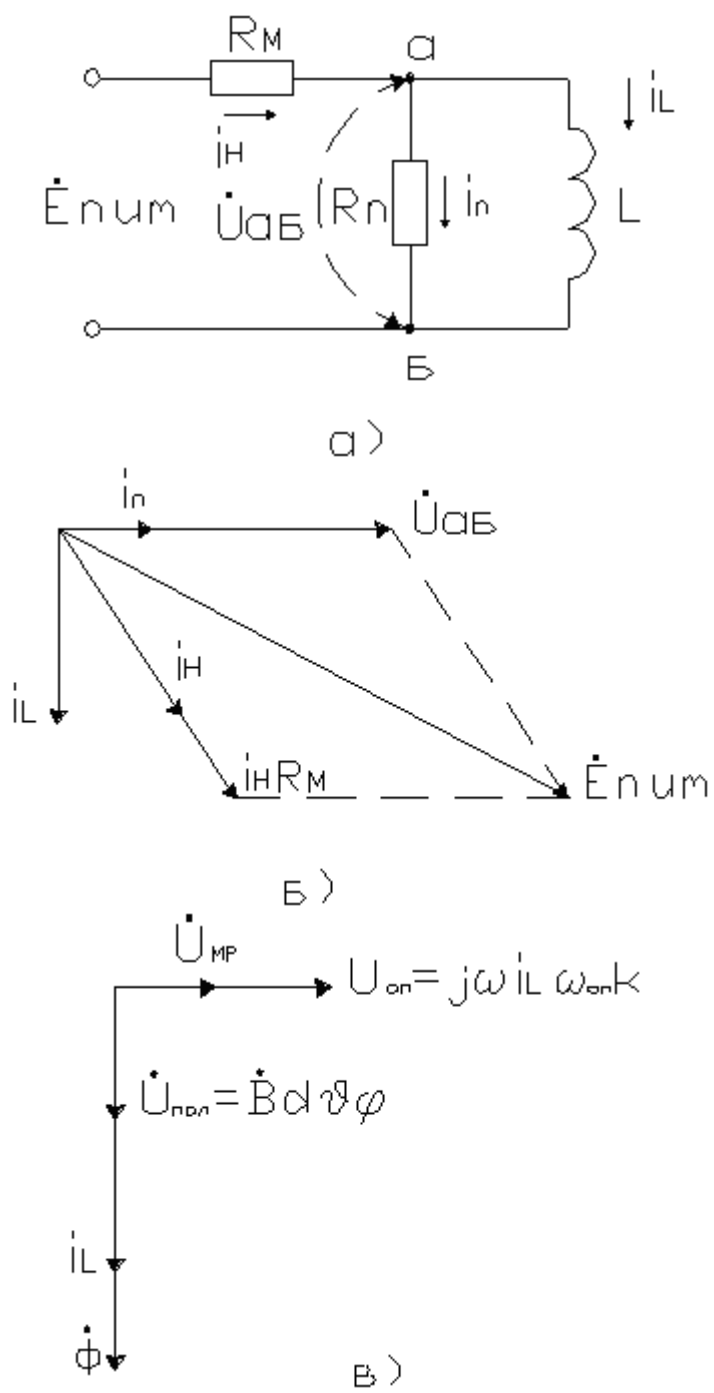


Рисунок 2.9 - Эквивалентная схема индуктора - а); векторная диаграмма токов и напряжений индуктора - б); векторная диаграмма выходных напряжений электромагнитного датчика - в) векторная диаграмма трансформаторной ЭДС .

Схематично подобный подход представлен на рис. 2.10а, где приняты следующие обозначения:

w_B - обмотка возбуждения;

$w_{оп}$ - обмотка, при помощи которой получают опорное напряжение;

$U_{оп}$ - напряжение на опорной катушке $w_{оп}$;

Φ - магнитный поток, изменяющийся по синусоидальному закону;

$U_{пол}$ - напряжение на электродах, пропорциональное расходу;

$U_{из}$ - напряжение на электродах, пропорциональное трансформаторной э.д.с.

Пусть магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения w_B имеет следующий вид:

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t,$$

где

ω - круговая частота напряжения питания.

Тогда напряжение трансформаторной э.д.с. $e_{тр}$ будет иметь следующий вид:

$$e_{тр} = K_{тр} \frac{d\Phi(t)}{dt} = K_{тр} \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t,$$

где

$K_{тр}$ - коэффициент пропорциональности, определяемый конструктивными данными, эффективной площадью контура образованного $R_{вн}$, соединительными проводами и $R_{вх}$ измерительного преобразователя (см.рис. 2.6,16). Полезная составляющая выходного напряжения имеет следующий вид:

$$e_{пол} = B(t) v d = \frac{\Phi(t)}{s} v d = \frac{\Phi_m}{s} \sin \omega t \cdot v \cdot d,$$

где

$B(t)$ - индукция магнитного поля;

v - средняя скорость среды;

$B=\Phi/s$ - здесь s - эффективная площадь воздушного зазора;

d - расстояние между электродами (диаметр условного прохода).

Напряжение на обмотке $w_{оп}$ будет иметь вид:

$$u_{оп} = K_{оп} \frac{d\Phi}{dt} = K_{оп} \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t,$$

где

$K_{оп}$ - коэффициент пропорциональности, определяемый конструктивными данными обмотки $w_{оп}$ (числом витков и эффективной площадью).

Из выражений для $e_{тр}$, $e_{пол}$ и $u_{пол}$ видно, что напряжение $u_{оп}$ и $e_{тр}$ = синфазны, а напряжение $e_{пол}$ - сдвинуто относительно опорного на 90 градусов.

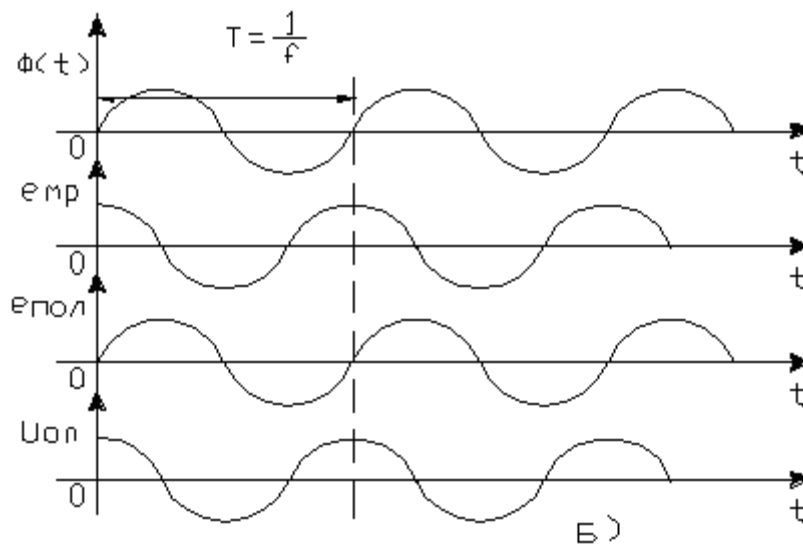
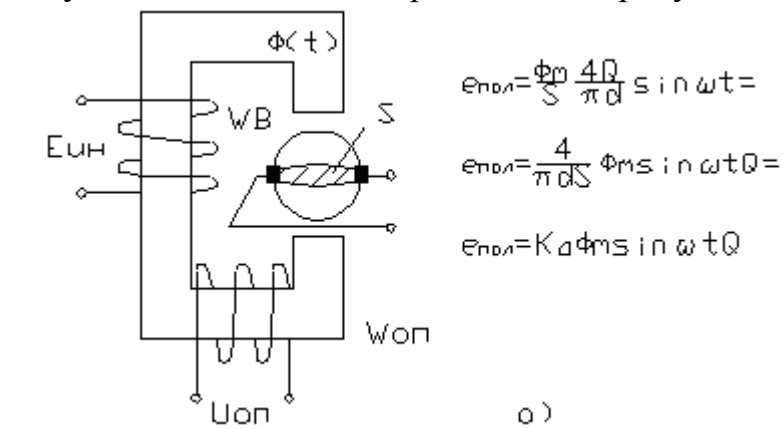


Рисунок 2.10 - а) Рисунок, поясняющий образование опорного напряжения $U_{оп}$; б) временные диаграммы, поясняющие фазовые соотношения между $U_{оп}$, $e_{пол}$, $\Phi(t)$,

Временные диаграммы, поясняющие данное обстоятельство представлены на рис. 2.10б.

Один из возможных вариантов преобразования выходного напряжения электромагнитного датчика в напряжение, пропорциональное расходу, представлен на рис. 2.11а, где приняты следующие обозначения:

ФСУ - фазосдвигающее устройство, служащее для сдвига фазы опорного напряжения $u_{оп}$ на 90° ;

ФУН - формирователь управляющего напряжения, формирующий прямоугольные импульсы, фронты которых совпадают с моментами перехода через ноль входного напряжения;

ФЧВ1,2 - фазочувствительные выпрямители, выходное напряжение которых (в виде среднего значения) пропорционально фазовому сдвигу между управляющим и входным напряжениями;

Ус- усилитель напряжения, снимаемого с электродов электромагнитного датчика;

Дел- делитель напряжений, подаваемых с выходов ФЧВ1 и ФЧВ2. Причем выходное напряжение ФЧВ1 делится на выходное напряжение ФЧВ2.

В качестве фазосдвигающего устройства может быть использован интегратор переменного напряжения, тогда выходное напряжение на выходе ФСУ будет иметь следующий вид:

$$U_{фсу} = \frac{1}{RC} \int U_{оп} dt = \frac{1}{RC} \int K_{оп} \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t \cdot dt$$

$$U_{фсу} = \frac{\omega K_{оп} \cdot \Phi_m}{RC \omega} \sin \omega t = \frac{K_{оп} \cdot \Phi_m}{RC} \sin \omega t$$

Временные диаграммы соответствующих напряжений представлены на рис. 2.10б. Среднее значение выходного напряжения ФЧВ1 будет иметь вид:

$$U_{фчв1} = \frac{v_d}{s} K_{ус} K_{фчв1} \Phi,$$

где

$U_{фчв1}$ - среднее значение выходного напряжения ФЧВ1;

Φ - среднее значение потока;

$K_{ус}$ - коэффициент усиления входного усилителя;

$K_{фчв1}$ - коэффициент усиления ФЧВ1.

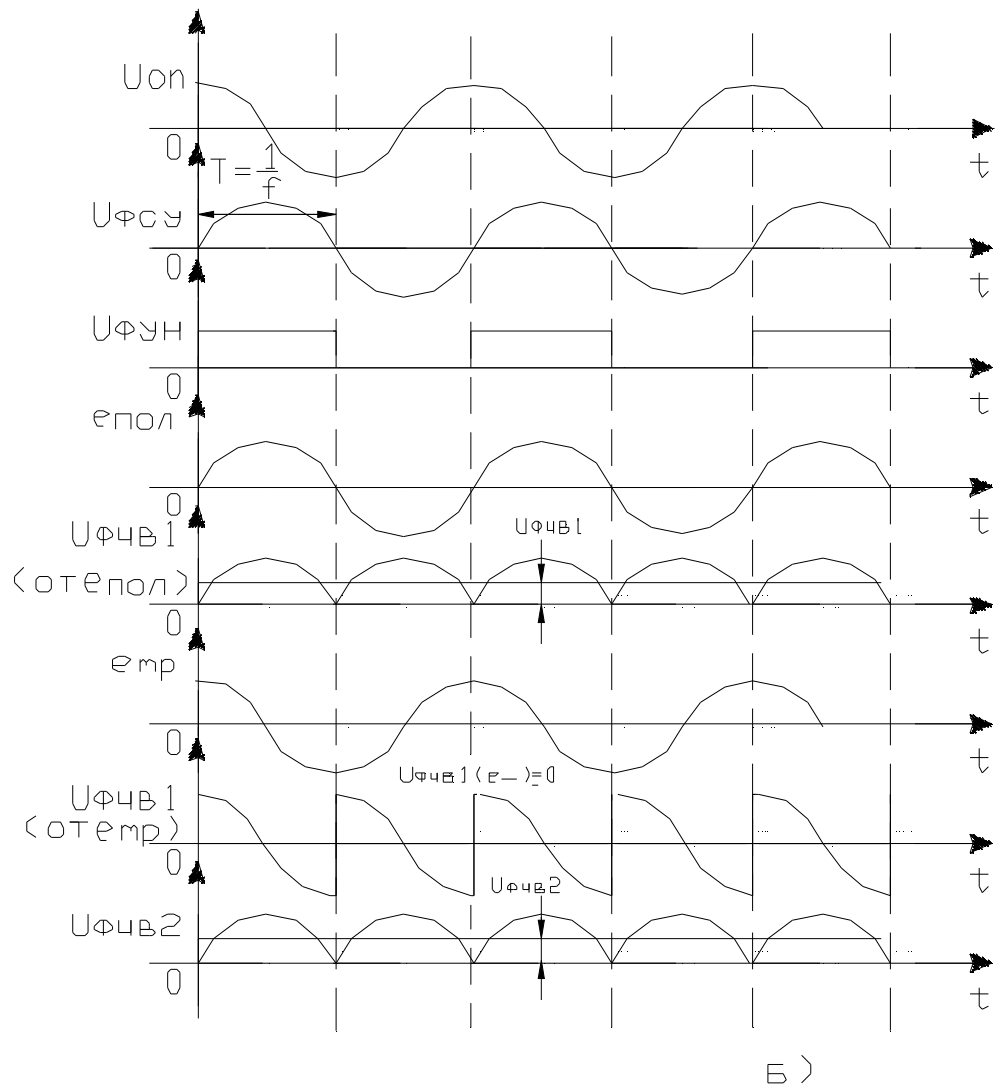
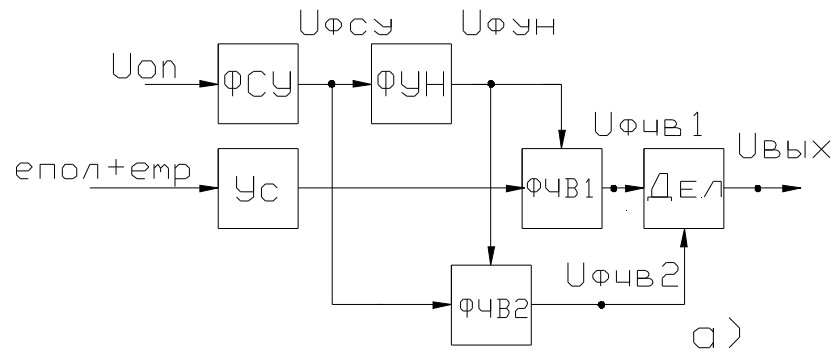


Рисунок 2.11 - Рисунок, поясняющий способ преобразования выходного напряжения электромагнитного датчика : а) - функциональная схема ; б) - временные диаграммы, для большей наглядности напряжения емр и eпол и их преобразования в ФЧВ1 показаны врознь .

Среднее значение выходного напряжения ФЧВ2 будет иметь следующий вид:

$$U_{фчв2} = \frac{K_{оп} \cdot K_{фв2} \cdot \Phi}{R \cdot C},$$

где

$K_{фчв2}$ - коэффициент усиления ФЧВ2.

На выходе делителя будет напряжение, пропорциональное частному от деления $U_{фчв1}$ на $U_{фчв2}$.

$$U_{вых} = K_{дел} \frac{v d}{s} \cdot \frac{K_{ус} \cdot K_{фв1} \cdot \Phi}{K_{оп} \cdot K_{фв2} \cdot \Phi} = \frac{K_{дел} \cdot K_{ус} \cdot K_{фв1}}{K_{оп} \cdot K_{фв2} \cdot s} \cdot v \cdot d,$$

где

$K_{дел}$ - коэффициент усиления делителя напряжения .

Или представляя среднюю скорость измеряемой среды через поток

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v \Rightarrow v = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

и, подставляя данное выражение в предпоследнюю формулу, можно получить

$$U_{вых} = \frac{4}{\pi d} \cdot \frac{K_{ус} \cdot K_{фв1} \cdot K_{дел}}{K_{оп} \cdot K_{фв2} \cdot s} Q.$$

Как видно из последнего выражения выходное напряжение делителя напряжения пропорционально расходу Q и не зависит от значения магнитного потока Φ и частоты питающего индуктора напряжения.

Из изложенного выше следует, что основная задача, выполняемая измерительным преобразователем заключается (кроме усиления выходного напряжения электромагнитного датчика) в обеспечении выходного показания, независимо от состояния индуктора и значения питающего напряжения (амплитуды и частоты).

В реальных условиях эксплуатации чрезвычайно сложно обеспечить стабильность магнитного потока Φ , формируемого в индукторе. С одной стороны изменяется как амплитуда, так и частота питающего обмотку возбуждения

напряжения, с другой - с изменением температуры изменяется сопротивление медного провода и потери на перемагничивание сердечника.

Кроме того, поток изменяется, если в измеряемой среде присутствуют ферромагнитные включения. С целью обеспечения независимости измерения расхода от вариаций магнитного потока, как правило его измеряют при помощи дополнительной обмотки $w_{оп}$, с последующим учетом измеренного значения в измерительной схеме. Особенно ощутимы вариации потока при питании индуктора переменным напряжением.

Известно большое число реализаций измерительных схем для электромагнитного датчика, работающих с синусоидальным магнитным полем. Как правило, все они представляют собой различные модификации автоматических компенсаторов переменного тока.

2.5 Способы компенсации квадратурных составляющих выходного сигнала электромагнитного датчика. Способы компенсации влияния электрохимической Э.Д.С.

2.5.1 Измерительные цепи расходомеров типа ИР

Одним из первых серийных расходомеров, выпускаемых в СССР был расходомер ИР-11. Функциональная схема данного расходомера представлена на рис. 2.12. Поступающее от электромагнитного датчика напряжение сравнивается компенсирующим трансформатором ТР с выходным напряжением элемента Холла ЭХ. Разность этих напряжений подается на вход избирательного усилителя У1, обладающего большим коэффициентом усиления. Усиленный сигнал подается на фазочувствительный усилитель ФЧВ, на выходе которого выделяется постоянная составляющая напряжения. Выходной усилитель У2 создает унифицированный сигнал постоянного тока. Показания миллиамперметра mA, включенного в выходную цепь, пропорциональны значению расхода. Ток с выхода У2 поступает в модулятор М, представляющий собой дроссель с элементом Холла в воздушном зазоре. Катушка возбуждения дросселя включена последовательно с обмоткой возбуждения преобразователя, благодаря чему устраняется влияние колебаний напряжения и частоты питающей сети. Коэффициент передачи схемы обеспечивается перераспределением тока в цепи управления модулятора. Нулевое положение расходомера регулируется подачей тока на модулятор от источника опорного напряжения.

Недостатком данной схемы является отсутствие компенсации трансформаторной э.д.с., последовательная схема сравнения, а стало быть и

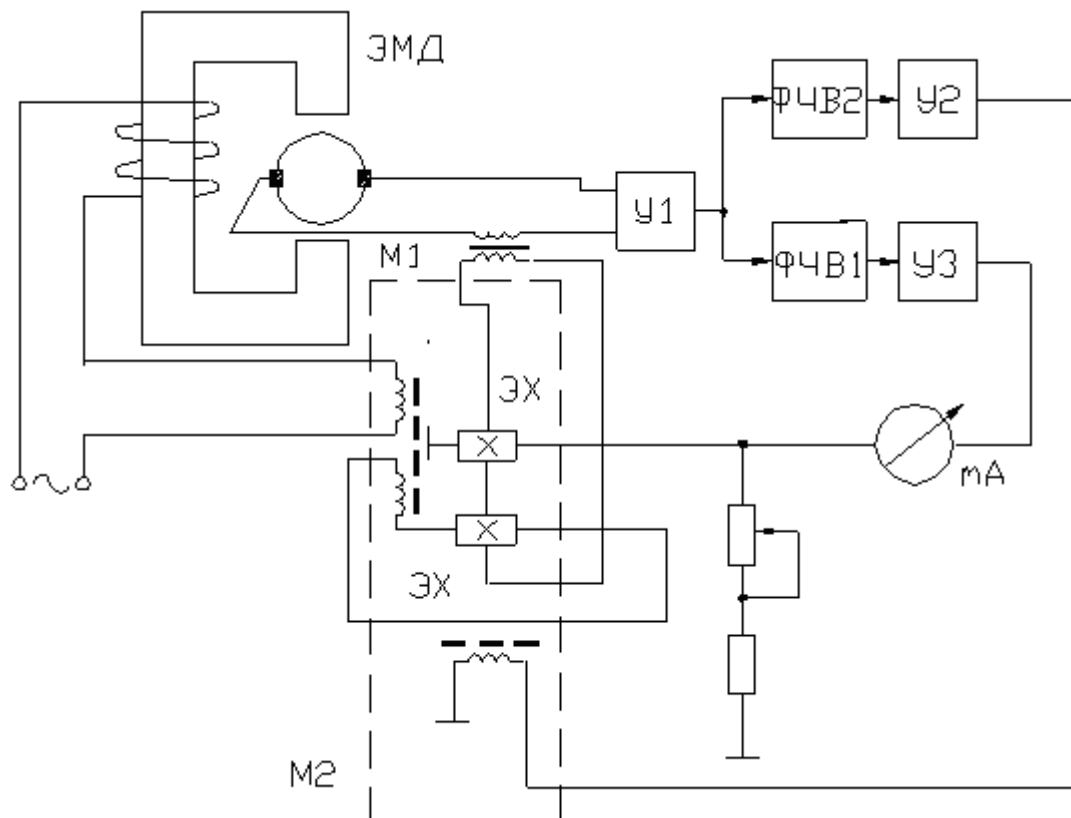


Рисунок 2.13 - Измерительная схема расходомера ИР-51

Хотя в данном расходомере и осуществляется автоматическая компенсация трансформаторной э.д.с., однако, вариации магнитного потока датчика компенсируются не в полной мере и, как и в ИР11, сигналы обратной связи сравниваются со входным по последовательной схеме сравнения, что снижает помехочувствительность измерительного преобразователя.

Измерительная схема расходомера ИР-61 до сих пор выпускаемого серийно лишена указанных недостатков, хотя в ней и отсутствует автоматическая компенсация трансформаторной э.д.с. Функциональная схема расходомера ИР-61 представлена на рис. 2.14. Отличительной чертой данного расходомера является наличие обмотки $w_{оп}$ (см.рис. 2.10,19), выходное напряжение которой пропорционально потоку Φ . Фазосдвигающее устройство ФСУ сдвигает фазу напряжения $u_{оп}$ на 90° , полученное напряжение используется для формирования напряжения обратной связи и управления фазочувствительным выпрямителем ФЧВ, не пропускающим на выход трансформаторную составляющую выходного сигнала электромагнитного датчика.

Постоянная составляющая ФЧВ подается на модулятор М, выполненный на элементе Холла ЭХ, выходное напряжение М при помощи усилителя Ус2 усиливается и подается на один из входов Ус3. На другой вход которого, через разделительную RC цепочку, подается напряжение с выхода входного усилителя

Ус1. Выходной преобразователь ВП преобразует напряжение с выхода ФЧВ в выходной ток, при помощи выходного преобразователя ВП. Выходной сигнал ЭДМ подается на вход Ус1, выполненного в виде усилителя с симметричным входом и обладающего значительным входным сопротивлением (порядка нескольких десятков МОм). Данный усилитель преобразует симметричный входной сигнал в несимметричный, а так же подавляет синфазные помехи, возникающие от продольных токов по измеряемой среде или трубопроводу. Коэффициент усиления Ус1 находится на уровне 10. CR -цепочка, стоящая на выходе усилителя, не пропускает на вход Ус3 постоянную составляющую, вызванную электрохимической э.д.с. и напряжением смещения УС1.

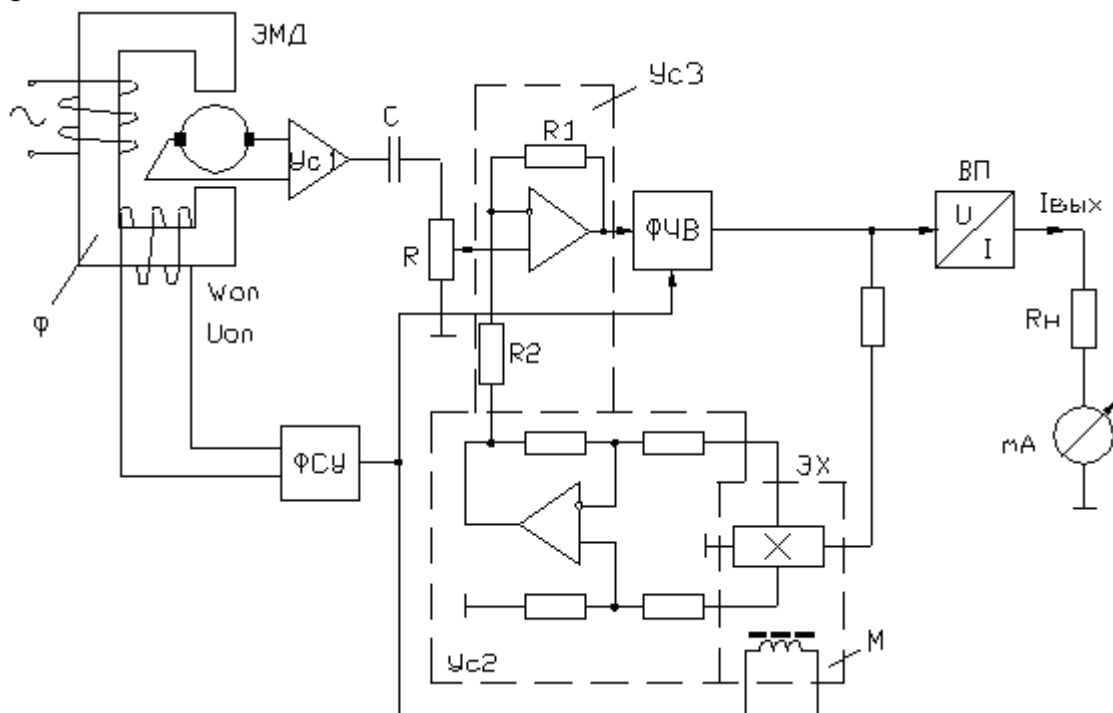


Рисунок 2.14 - Измерительная схема расходомера ИР-61

Как видно из функциональной схемы (рис. 2.14) расходомер ИР-61 практически лишен недостатков, свойственных расходомерам ИР-11, ИР-51. Отсутствие автоматической компенсации трансформаторной составляющей выходного напряжения практически не сказывается на эксплуатационных характеристиках расходомера, поскольку ее компенсация осуществляется при помощи переменного резистора, установленного непосредственно в самом ЭМД (см.рис. 2.8б), при монтаже расходомера.

Следует подчеркнуть, что данным типом расходомеров свойственны следующие недостатки: значительное потребление энергии (сотни ВА), большое число соединительных проводов (шесть проводов плюс экраны), дороговизна ЭМД (шихтованное железо, сложность укладки обмоток, значительный вес и габариты), существенные эксплуатационные расходы.

2.5.2 Измерительные цепи электромагнитных датчиков с частотой питания, кратной 50Гц

Известны способы питания электромагнитных датчиков частотами кратными 50Гц, в частности частотой 25Гц [8,9].

Функциональная схема одного из вариантов [8] представлена на рис. 2.15, временные диаграммы, поясняющие работу устройств, представлены на рис. 2.16. На рис. 2.15 приняты следующие обозначения:

ДЧ - делитель частоты, формирующий сигнал прямоугольной формы, кратной частоте питающей сети;

ИУ - избирательный усилитель, формирующий сигнал синусоидальной формы;

УМ - усилитель мощности, синусоидальный для ИУ и обмотки возбуждения индуктора ЭМД;

ФСУ - фазосдвигающее устройство, сдвигающее фазу напряжения $U_{оп}$ на 90°;

В - выпрямитель, преобразующий выходное переменное напряжение ФСУ в постоянное, используемое для обратного интегрирования;

К1,К2- компараторы напряжения, формирующие фронты в момент перехода через ноль входного напряжения;

Кл1..3- ключи, подающие соответствующие напряжения на вход интегратора Инт;

Ф1..Ф3-формирователи коротких запускающих импульсов по фронтам, служащие для управления работой R-S триггеров;

T1,T2 -R-S-триггеры;

$t_{и}$ - выходная длительность импульсов.

пронизывающим витки $W_{оп}$.

На выходе фазосдвигающего устройства ФСУ, в качестве которого используется интегратор переменного напряжения, будет иметь вид:

$$U_{фсу} = j\omega W_{оп} IL K3 K_{фсу}(j\omega),$$

при использовании в качестве ФСУ интегратора с $K_{фсу}(j\omega) = 1/j\omega RC$:

$$U_{фсу} = \frac{j\omega \cdot W_{оп} \cdot IL \cdot K3}{j\omega RC} = IL \frac{W_{оп}}{RC}$$

т.е. выходное напряжение ФСУ не зависит от частоты питающего индуктор напряжения и определяется только током индуктивности IL . Данное переменное напряжение при помощи выпрямителя V преобразуется в постоянное напряжение, используемое в качестве опорного в цикле обратного интегрирования.

В цикле прямого интегрирования на вход интегратора подается напряжение с выхода U_c . При этом среднее значение от напряжения $U_{тр}$ и напряжения помехи питающей сети равно нулю. Таким образом, полезный сигнал в виде длительности импульса t_u будет иметь следующий вид:

$$\frac{t_u}{T} = \frac{U_{пол}}{U_{фсу}} = \frac{K1 \cdot d \cdot RC}{W_{оп} \cdot K3} \cdot V_{cp},$$

где

RC - элементы фазосдвигающего устройства.

2.5.3 Электромагнитные расходомеры с емкостными электродами

При измерении расхода сильно загрязненных, агрессивных жидкостей, а также сред, обладающих смешанной электрической проводимостью, на поверхности электродов могут образоваться осадки или коррозии, что затрудняет непосредственный съем сигнала с выводов электродов. В этих случаях применяют различные методы очистки электродов механические, ультразвуковые или химические, либо производят замену электродов, что связано со значительными эксплуатационными затратами.

Применение электромагнитных расходомеров с емкостными электродами позволяет измерять расход в указанных условиях без существенного повышения

стоимости обслуживания [10].

Физическая модель датчика с емкостными электродами и эквивалентная схема замещения представлены на рис. 2.16.

Измерительные электроды такого датчика помещены внутри изоляционного покрытия внутренней стенки измерительного участка трубопровода и не контактируют с измеряемым потоком. Каждый электрод и смазывающая внутреннюю поверхность покрытия проводящая жидкость образуют обкладки конденсатора $C_э$, в котором диэлектриком является слой покрытия. Поскольку емкость конденсатора очень малая (единицы пикофард), то для снижения влияния паразитных емкостей $C_{пар}$, $C_{иэ}$ (см.рис. 9), используют экранирующий электрод, отделяющий измерительный электрод от других конструктивных элементов датчика. Соответствующие емкости между измерительным электродом и экранирующим электродом обозначены на рис. 2.16 - $C_{э.эк1}$, $C_{э.эк2}$. Если поддерживать потенциал экранирующего электрода равным потенциалу измерительного электрода, то значительная доля емкостных токов, протекающая по конденсаторам $C_{пар}$, $C_{иэ}$ замкнется на экранирующий электрод и соответственно не попадет на измерительный электрод.

Для еще большего снижения влияния емкостных токов применяют так называемое эквивалентное экранирование, сущность которого сводится к поддержанию потенциала экранирующего электрода потенциалу, находящемуся на измерительном электроде. Причем источник потенциала, от которого питается экранирующий электрод, должен иметь выходное сопротивление существенно меньшее, чем эквивалентное сопротивление соответствующих емкостей $C_{э.эк}$, $C_э$, $C_{пар}$, $C_{иэ}$. Для этой цели используют высокоомные повторители напряжения (см.рис. 2.16б). Таким образом удастся существенно снизить эквивалентное влияние емкости $C_{э.эк}$ (до 0.03 - 0.01пФ), а, стало быть, и влияние емкостных токов утечки. Для снижения фазовых ошибок, при измерении сигнала с электродов необходимо использовать усилители с высоким выходным сопротивлением электрометрические усилители. Кроме того, данные усилители необходимо располагать в непосредственной близости от электродов для минимизации паразитных емкостей соединительных проводов.

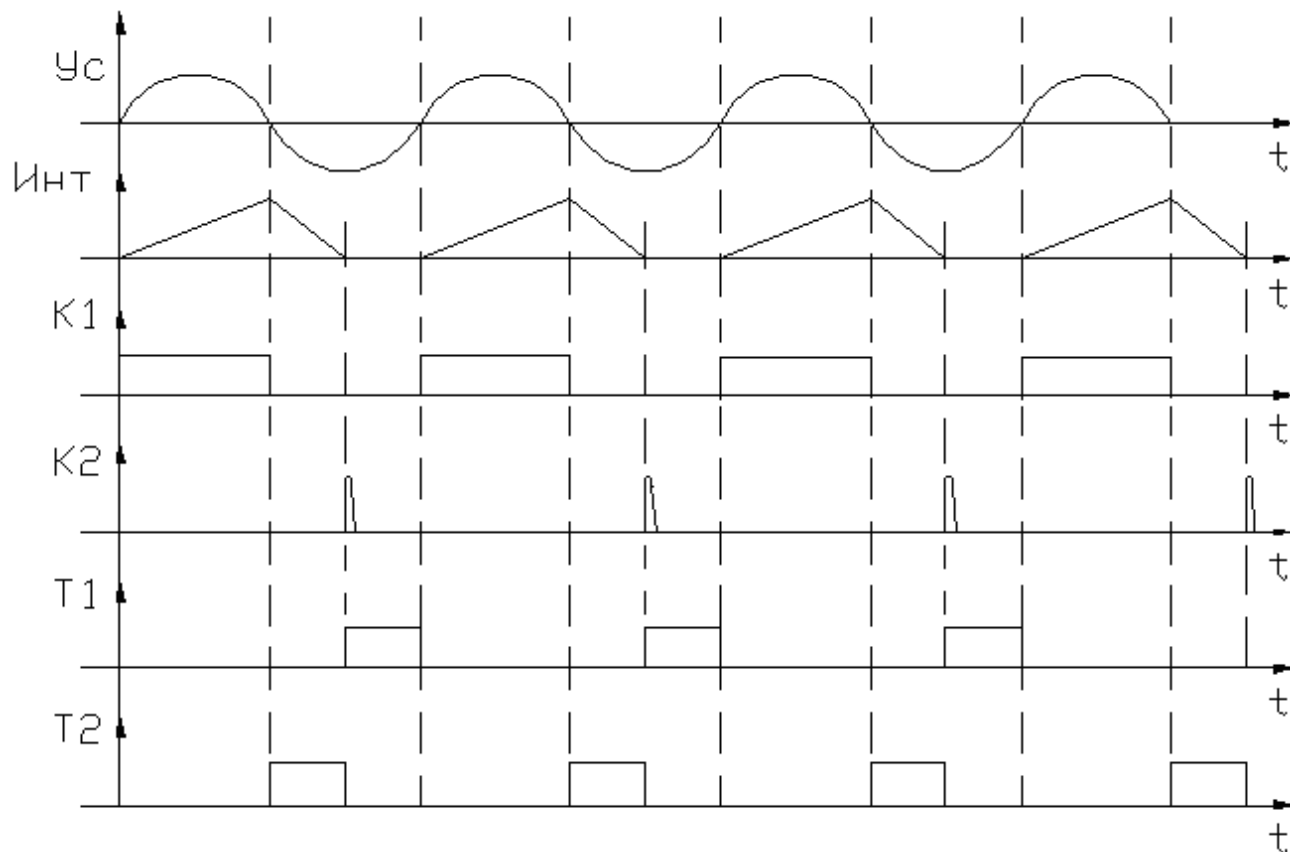


Рисунок 2.16 - Временные диаграммы, поясняющие работу расходомера с магнитным полем частотой 25 Гц

Следует отметить, что подобные расходомеры питаются напряжением повышенной частоты, что предъявляет особые требования к магнитной системе индуктора.

2.5.4 Электромагнитные расходомеры с магнитным полем, изменяющимся по линейному закону

При питании индуктора периодически линейно возрастающим и убывающим током низкой частоты (0.8 Гц) оказывается весьма просто избавиться от трансформаторной э.д.с. [10].

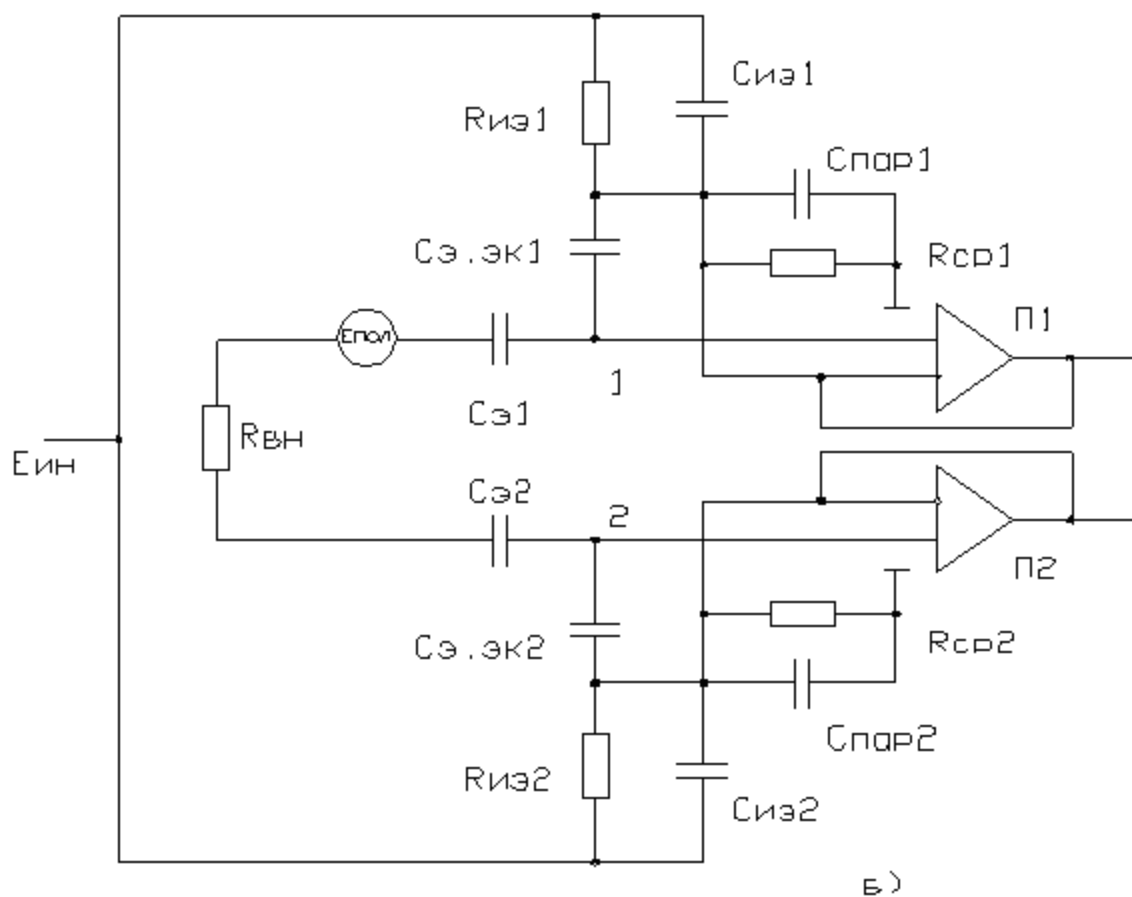
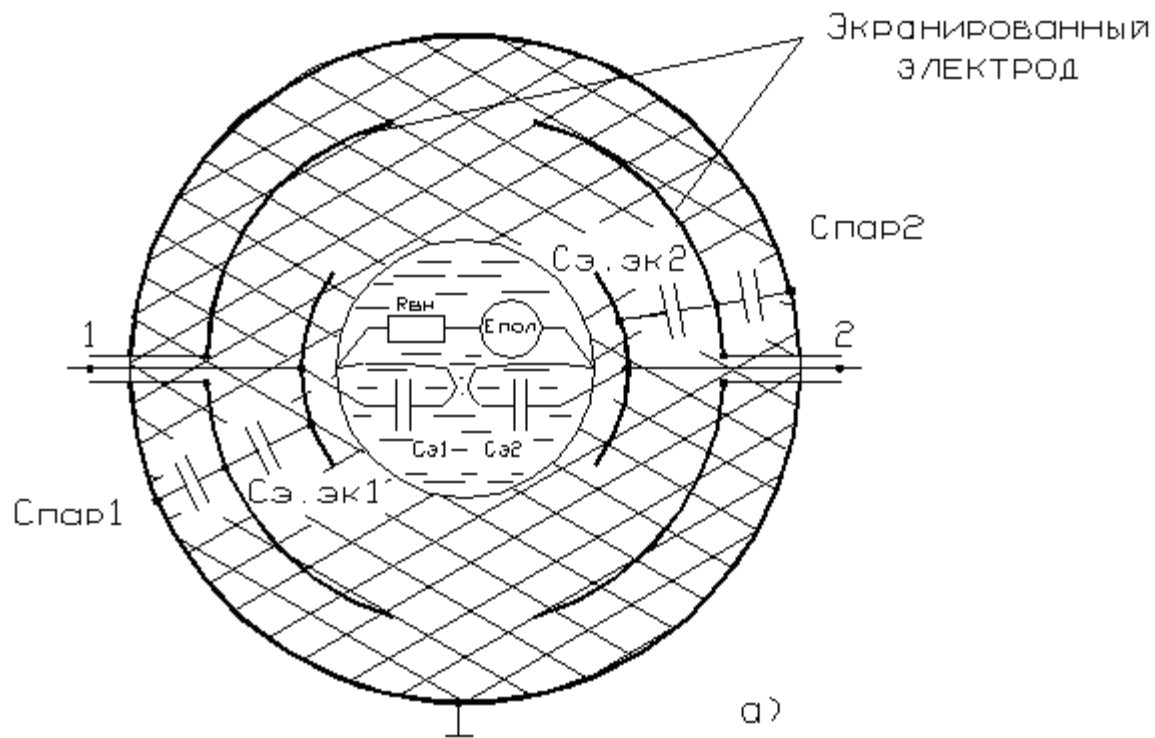


Рисунок 2.17 - а) Физическая модель датчика с емкостным электродом; б) эквивалентная схема замещения датчика.

Поскольку магнитное поле пропорционально току индуктора I_L , а полезный сигнал, снимаемый с электродов $U_{пол}$, пропорционален индукции, то он также будет линейно нарастать и убывать. Трансформаторная составляющая выходного сигнала пропорциональна производной линейного поля, и, при идеальной линейности изменения тока, будет представлять собой постоянную составляющую положительной или отрицательной полярности в зависимости от знака изменения магнитного поля. При этом оказывается возможным данную постоянную составляющую скомпенсировать.

Временные диаграммы, поясняющие работу расходомера представлены на рис. 2.17, функциональная схема на рис. 2.18. В интервалы времени, когда трансформаторная э.д.с. $U_{тр}$ представляет собой установившееся значение, формируются импульсы выборки $U_{выб}$, которыми управляются аналоговые запоминающие устройства $УВХ1$ и $УВХ2$, выходные напряжения которых затем вычитаются при помощи дифференциального усилителя ДУ. В результате выходной сигнал ДУ будет пропорциональным значению только полезной составляющей напряжения $U_{тр}$ и напряжение, вызванное электрохимическими причинами будет скомпенсировано.

2.5.5 Расходомеры с импульсным магнитным полем

В последние годы широкое распространение получили расходомеры с импульсным питанием, среди которых наиболее часто используются питание разнополярными импульсами без паузы, разнополярными импульсами с паузой и однополярными импульсами (см.рис. 2.3). При использовании импульсного питания появляется возможность существенно упростить как электромагнитный датчик, так и измерительную схему. Это вызвано следующими причинами:

- при установившемся токе в индукторе отсутствует трансформаторная э.д.с.;
- отсутствует фазовый сдвиг, вызванный потерями в стали, а, стало быть, ток питания индуктора строго пропорционален потоку или индукции в воздушном зазоре;
- отпадает необходимость в шихтовании железа, что существенно
- упрощает электромагнитный датчик и дает возможность использовать магнитопровод в качестве корпусного элемента конструкции;
- вместо шести соединительных проводов достаточно четырех;
- значительно падает мощность, потребляемая электромагнитным
- датчиком, поскольку сопротивление обмоток при импульсном питании существенно ниже, чем при питании синусоидальным напряжением.

Сравнение конкретных технических характеристик расходомеров с синусоидальным магнитным полем 50Гц частоты и импульсным магнитным полем

представлено таблицей 9. В таблице сравниваются варианты широко известных расходомеров DISCOMAG швейцарской фирмы Flowtec AG [12]. Из данной таблицы видно, что расходомеры с импульсным полем обладают повышенной точностью и пониженным энергопотреблением. В части энергопотребления достигнуты значительные успехи, о чем свидетельствует создание электромагнитных расходомеров, питаемых от автономных источников и расходомеров, пригодных для использования во взрывоопасных помещениях [13], так называемых искробезопасных [13], с потреблением не более 0.5Вт.

Среди расходомеров, выпускаемых в странах СНГ и обладающих импульсным магнитным полем наибольшее распространение получили следующие: ИПРЭ, РОСТ. В последние годы Таллиннский завод Промприбор также стал выпускать расходомеры с импульсным питанием ИР-43, ИР-45, СА-94.

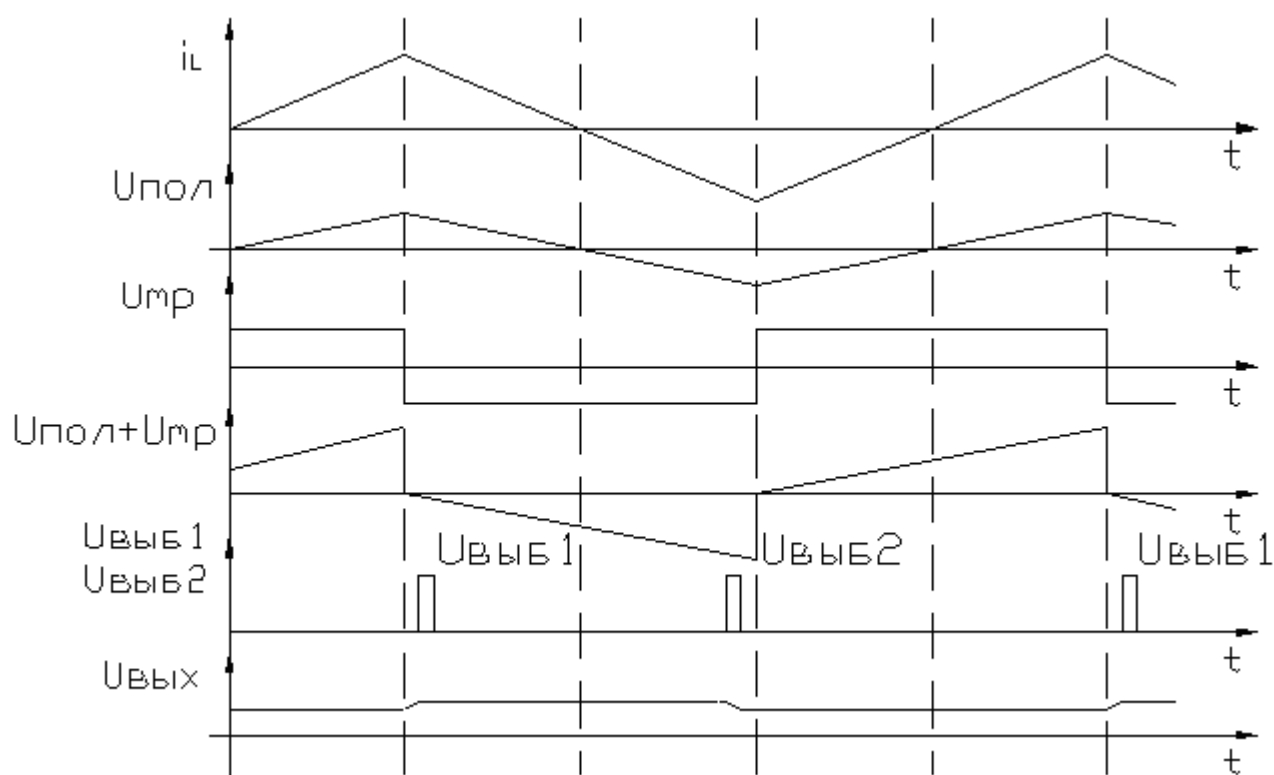


Рисунок 2.18 - Временные диаграммы, поясняющие работу расходомера с магнитным полем, изменяющимся по линейному закону.

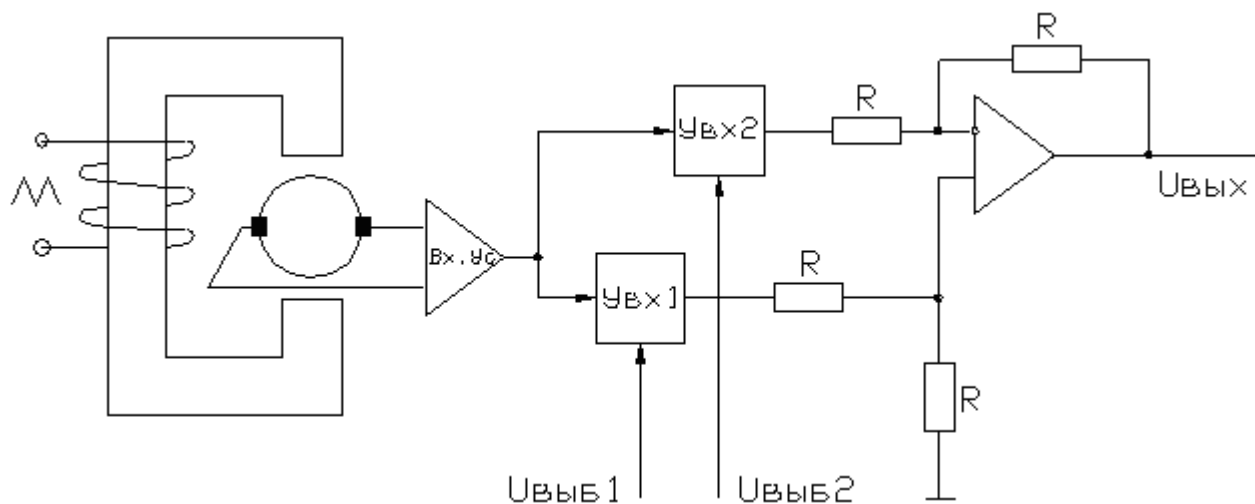


Рисунок 2.19 - Функциональная схема расходомера с изменяющимся по линейному закону магнитным полем

2.5.6 Расходомеры с однополярным магнитным полем

Одним из первых серийно производимых расходомеров с импульсным питанием является расходомер АО Арзамасского приборного завода ИПРЭ-1. Технические характеристики представлены в приложении 1. Функциональная схема ИПРЭ-1 представлена на рис. 2.20, где приняты следующие обозначения:

ИП - источник питания, формирующий прямоугольное напряжение питания, подаваемое на обмотку возбуждения w_B ;

w_B - обмотка возбуждения;

$w_{оп}$ - обмотка опорного напряжения, используемого в целях компенсации изменения индукции магнитного поля в датчике;

ВУ - входной усилитель, согласующий симметричный входной сигнал с электродов электромагнитного датчика с измерительным преобразователем;

УПК - усилитель с периодической коррекцией, служащий для компенсации напряжения электрохимической э.д.с.;

УВХ - устройство выборки-хранения, необходимое для преобразования амплитуды импульсов с выхода УПК в постоянное напряжение;

Инт.П - интегрирующий преобразователь, преобразующий выходное напряжение с выхода обмотки $w_{оп}$ в постоянное напряжение;

ФП - функциональный преобразователь, формирующий напряжение, пропорциональное расходу (не зависящее от индукции магнитного поля).

Временные диаграммы, поясняющие работу расходомера, представлены на рис. 2.21. На обмотку возбуждения w_B от источника питания ИП подается прямоугольное периодическое напряжение с периодом 1.28 сек., и скважностью,

равной двум. Амплитуда напряжения равна 20В, а ток, отдаваемый в обмотку возбуждения 1.5-1.9А в зависимости от температуры обмотки $w_{в}$. Данное напряжение представлено на рис. 2.21а. Выходное напряжение на обмотке $w_{оп}$ имеет вид, представленный на диаграмме рис. 2.21б.

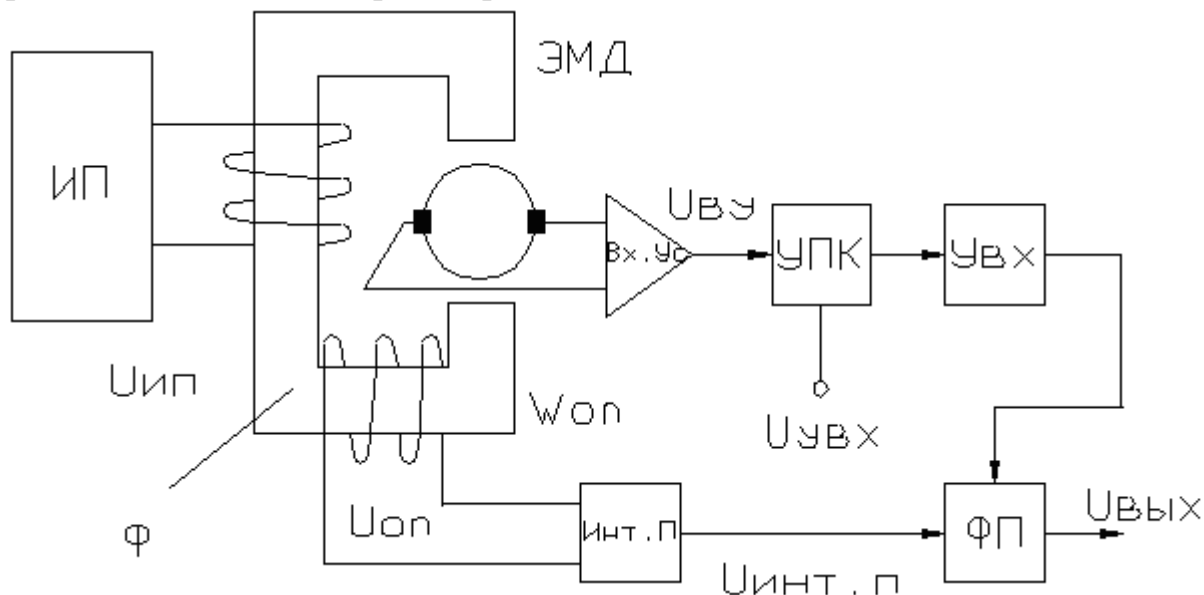


Рисунок 2.20 - Функциональная схема расходомера типа ИПРЭ-1

При помощи УВХ импульсное напряжение $U_{упк}$ преобразуется в постоянное напряжение (см.рис. 2.21д), поступающее на вход функционального преобразователя ФП. На другой вход которого поступает напряжение с Инт.П, пропорциональное индукции магнитного поля. В функциональном преобразователе происходит деление выходного напряжения УВХ на напряжение $U_{инт.п.}$ в результате чего получается сигнал, независимый от изменения магнитной индукции в датчике.

Далее этот сигнал преобразуется в выходной ток 0-5 или 4-20 мА. Технические характеристики расходомера ИПРЭ-1 представлены в приложении. Известны и другие реализации измерительных схем расходомеров с однополярным питанием с использованием вместо $u_{оп}$ шунта, напряжение на котором пропорционально току в индукторе [14,15].

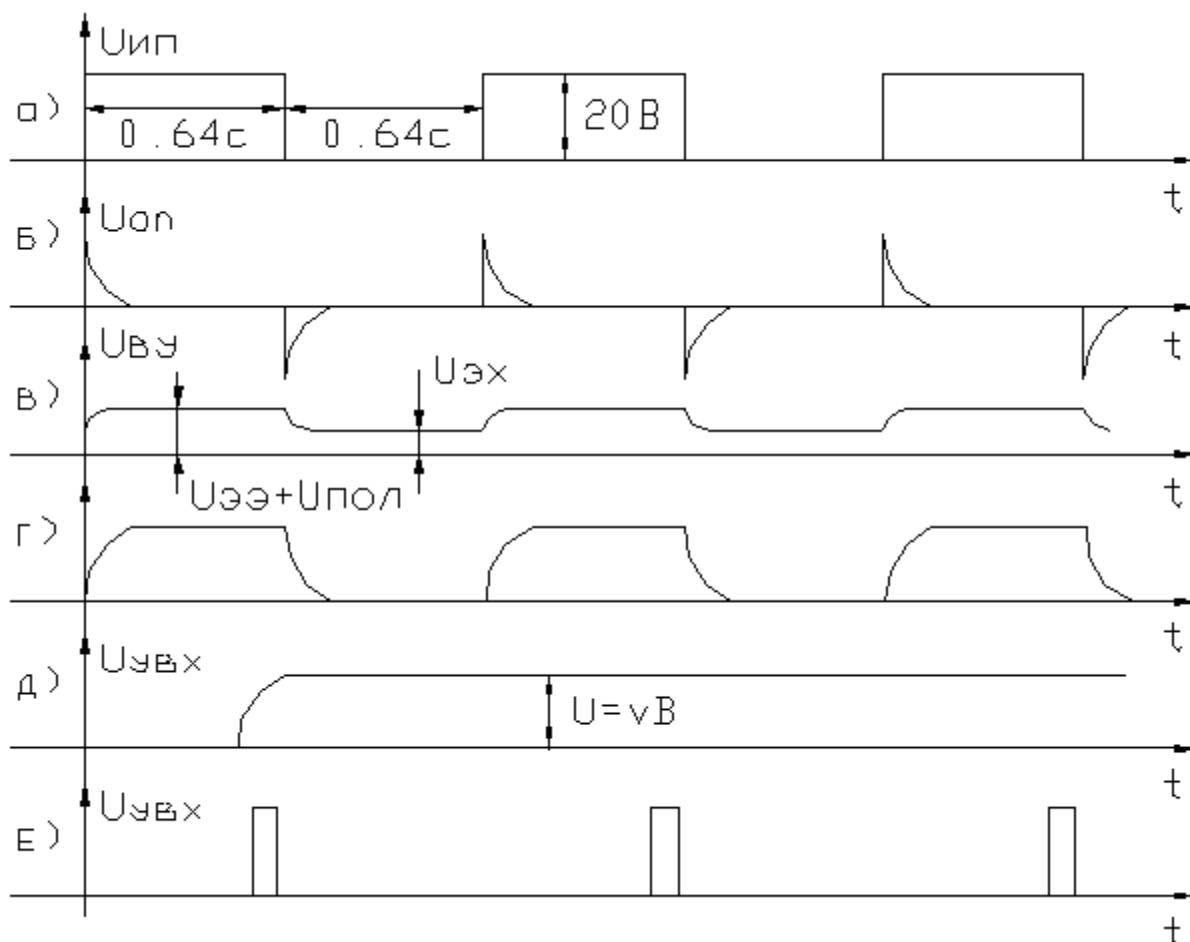


Рисунок 2.21 - Временные диаграммы, поясняющие работу ИПРЭ-1

2.5.7 Расходомеры с двухполярным магнитным потоком

Питание датчика двухполярным потоком, при прочих равных условиях, дает повышение чувствительности в два раза. С использованием такого питания работают такие расходомеры как РОСТ-1...РОСТ8, расходомеры фирмы Glorius (Дания), Flowtec AG (Швейцария) и др. В данных расходомерах отсутствуют дополнительные обмотки $w_{оп}$, а информация об изменении потока в электромагнитном датчике получается за счет измерения тока питания индуктора, например, при помощи шунта. Это позволяет связать измерительный преобразователь с датчиком не шестью проводами, а четырьмя. Шунт располагается в измерительном преобразователе. Алгоритм работы указанных преобразователей практически не отличается от алгоритма, представленного в разделе 2.10. Кроме того данное питание датчика позволяет осуществить режим рекуперации, т.е. использовать ток в индукторе для формирования противоположного импульса питания, что дает существенное снижение потребления электрической энергии. Рассмотрим работу измерительной схемы расходомера типа РОСТ-1;3, функциональная схема которого представлена на рис. 2.22, где приняты следующие

обозначения [16]:

ПУ - предварительный усилитель, служит целям согласования выходного сигнала датчика и измерительного преобразователя;

НУ - нормирующий усилитель, при помощи которого согласуется диапазон измерения и габариты датчика с измерительным преобразователем;

Уэт, Уэт- источники эталонного напряжения, используются для реализации операции обратного интегрирования, соответственно для положительной и отрицательной полуволн полезного сигнала $e_{пол}$;

УО - усилитель опорного сигнала, на выходе которого получается напряжение $U_{оп}$, пропорциональное току питания индуктора;

СПИ - стабилизатор питания индуктора;

ИПИ - источник питания индуктора;

К - коммутатор;

ИНТ - интегратор;

КМОП - компаратор;

СУ - схема управления;

МПУ - микропроцессорное устройство.

Предварительный усилитель (ПУ) имеет низкий уровень собственных шумов в диапазоне от нуля до единиц Гц; малое значение входного тока (для снижения уровня шумов, возникающих на участке электродо-измеряемой среды); значительный коэффициент подавления синфазной составляющей ($K_{псс} > 60\text{дБ}$).

Нормирующий усилитель (НУ) обеспечивает единый уровень выходного сигнала, соответствующий номинальному значению диапазона измерения, для всех возможных диапазонов изменения входного сигнала (коэффициент перекрытия диапазона 20).

От АЦП электромагнитного расходомера требуется высокая точность преобразования и эффективное выделение сигнала на фоне шумов и помех. В значительной степени этим требованиям удовлетворяют интегрирующий преобразователи с промежуточным преобразованием в интервал времени, поскольку в данных преобразованиях эффективно подавляется сетевая частота (при кратности времени прямого интегрирования периоду сети) и существенно снижается влияние шумов и помех за счет их осреднения во время прямого интегрирования.

Источник питания индуктора (ИПИ) формирует импульсы тока, необходимые для создания импульсного низкочастотного двухполярного магнитного поля возбуждения. Поскольку сигнал с электромагнитного датчика полностью повторяет форму тока питания индуктора и прямо пропорционален ему, задача стабилизации тока питания индуктора является одной из основных при построении расходомера. Однако, при полной стабилизации тока индуктора, т.е. импульсов тока двух

полярностей с амплитудой порядка $0.5A$, возрастает энергопотребление и усложняется аппаратная часть. Поэтому требуются специальные схемотехнические решения, обеспечивающие независимость выходного сигнала от стабильности тока индуктора.

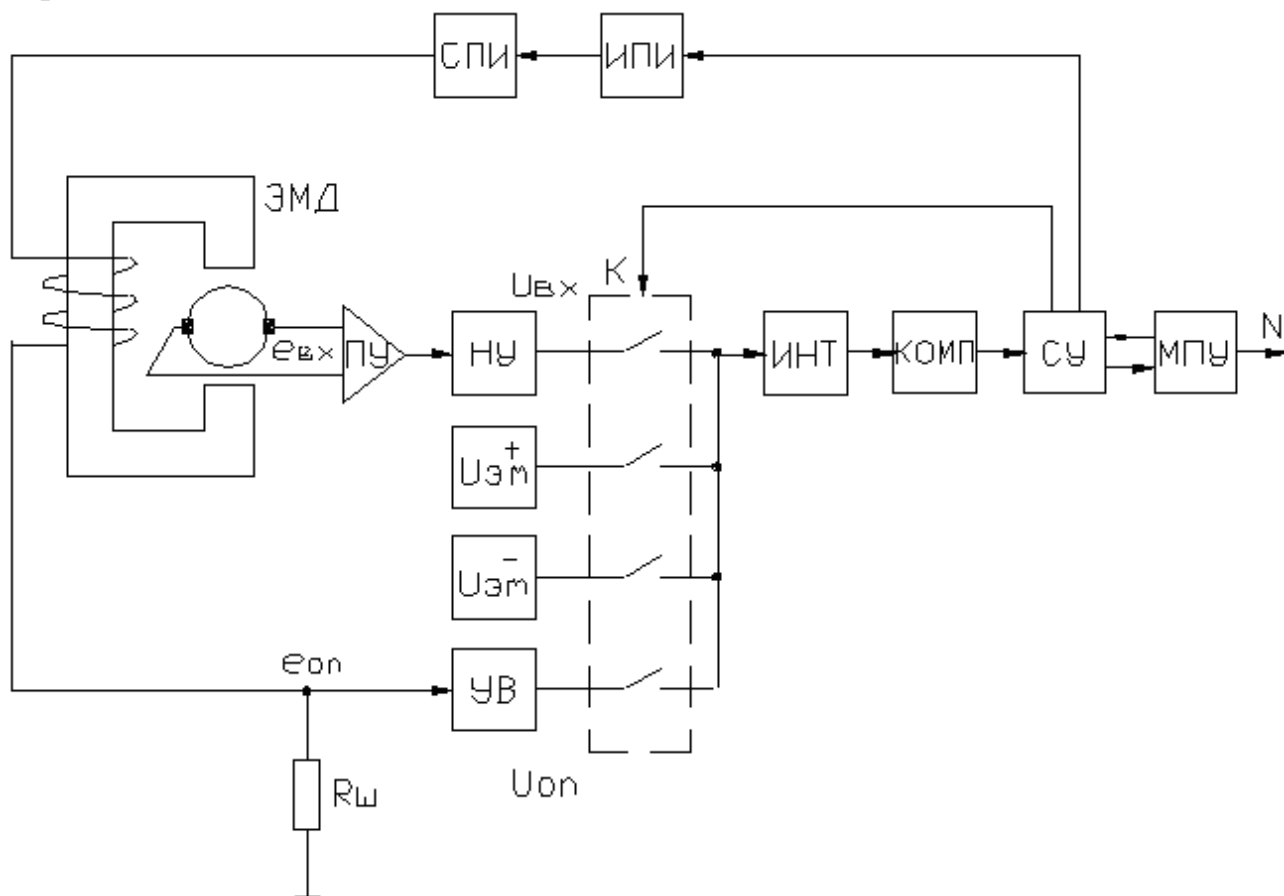


Рисунок 2.22 - Функциональная схема расходомера РОСТ-13

В приборах РОСТ-1 используются возможности микропроцессора осуществлять деление измеренных значений сигнала на значения опорного напряжения, пропорционального току индуктора. Кроме того, микропроцессорное устройство (МПУ) обеспечивает управление работой ИПИ и АЦП, проводит статистическую обработку результатов измерения, диагностику отдельных узлов и передает результаты в виде цифрового кода на ЦАП (в РОСТ-1) или на универсальное микропроцессорное измерительное устройство (в РОСТ-3).

ИПИ, управляемый сигналами с СУ, формирует импульсы тока положительной и отрицательной полярности, разделенные нулевыми промежутками. Причем длительность положительных, отрицательных импульсов и промежутков равны между собой, частота повторения импульсов равна 0.78Гц и привязана к частоте сети.

Коммутатор К под действием управляющих сигналов СУ подключает ко входу интегратора каналы измерения входного и опорного напряжений, причем канал измерения опорного напряжения подключается на один цикл после нескольких

циклов измерения входного напряжения.

Аналого-цифровое преобразование осуществляется методом двойного интегрирования, т.е. путем заряда интегратора напряжениями $U_{вх}$ и $U_{оп}$ (время заряда кратно периоду сетевого напряжения) и разряда его эталонным напряжением $U_{эт}$ соответствующего знака. Окончание разряда фиксируется компаратором (КОМП), СУ формирует импульс, длительность которого равна времени разряда интегратора и пропорциональна измеряемому напряжению. В МПУ эта длительность преобразуется в цифровую форму, производится четырехкратное вычисление интервала времени, соответствующего входному напряжению ($T_{и}$), однократное вычисление интервала времени, соответствующего опорному напряжению ($T_{оп}$) и деление среднего значения $T_{и}$ на $T_{оп}$. Такой алгоритм позволяет уменьшить влияние шумов и внешнее воздействие, а также нестабильность тока индуктора.

За время прямого интегрирования выходное напряжение интегратора достигает значения

$$U_{вых} = \frac{1}{\tau} \int_0^{T^{int}} U_{вх}^+ dt \quad \text{или} \quad U_{вых} = \frac{1}{\tau} \int_0^{T^{int}} U_{оп}^+ dt .$$

Разряд интегратора происходит при подаче на его вход эталонного напряжения противоположной полярности. Интервал времени разряда продолжается до момента обрабатывания компаратора. При этом

$$U_{вых} = \frac{1}{\tau} \int_0^{T_{изм}^-} U_{вх}^- dt \quad \text{или} \quad U_{вых} = \frac{1}{\tau} \int_0^{T_{оп}^-} U_m^- dt .$$

Значение интервала времени разряда пропорционально измеряемому сигналу ($U_{вх}$ или $U_{оп}$) и для входного сигнала может быть записано в следующем виде

$$T^{+изм} = T'_{инт} \frac{U^{+вх}}{U^{-эт}}$$

$$T^{-изм} = T'_{инт} \frac{U^{-вх}}{U^{+эт}},$$

где

$U_{вх}$, $U_{вх}$ - измеряемые напряжения на входе интегратора (соответствующие импульсам положительного и отрицательного тока питания),

$$|U^{+вх}| = |U^{-вх}| = |e_{ex}| K_{пу} \cdot E_{ну}$$

$e_{вх}$ - напряжение на электродах электромагнитного датчика;

$K_{пу}$, $K_{ну}$ - соответственно коэффициенты передачи предварительного и нормирующего усилителей;

$T_{инт}$ - время интегрирования входного напряжения.

Полное время измерения за один период входного сигнала -

$$T_{изм} = T^{+изм} + T^{-изм} = T'_{инт} \left(\frac{U^{+вх}}{U^{-эм}} + \frac{U^{-вх}}{U^{+эм}} \right).$$

Время измерения опорного сигнала напряжения имеет аналогичный вид:

$$T_{оп} = T''_{инт} \frac{2e_{ex} \cdot K_{пу} \cdot K_{ну}}{U_{эм}},$$

где

$$|U^{+оп}| = |U^{-оп}| = |e_{on}| K_{оп}$$

$e_{оп}$ - опорное напряжение на входе УО;

$K_{оп}$ - коэффициент передачи усилителя опорного напряжения; $T_{инт}$ - время прямого интегрирования опорного напряжения.

С учетом того, что $|U^{+эм}| = |U^{-эм}| = U_{эм}$, можно записать:

$$T_{изм} = T'_{инт} \frac{2e_{ex} \cdot K_{пу} \cdot K_{ну}}{U_{эм}}$$

$$T_{оп} = T''_{инт} \frac{2e_{on} \cdot K_{оп}}{U_{эм}}.$$

Результат деления, пропорциональный отношению входного сигнала к опорному, получаемый в МПУ, имеет вид:

$$N = \frac{e_{ex}}{e_{on}} \cdot \frac{T'_{инт}}{T''_{инт}} \cdot \frac{K_{пу} \cdot K_{ну}}{K_{оп}}$$

Таким образом, из последнего выражения следует, что точность

преобразования определяется точностью и стабильностью коэффициентов усиления в трактах раздельного прохождения измеряемого и опорного напряжений.

3 ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

3.1 Термоэлементы прямого подогрева

3.1.1 Термохимический преобразователь. Принцип действия. Особенности использования. Область применения

Действие термохимических преобразователей основано на измерении теплового эффекта реакции беспламенного (термокаталитического) окисления газа на каталитическом элементе преобразователя, представляющем собой в простейшем случае нагреваемую электрическим током платиновую проволоку или мелкодисперсные металлы платиновой группы, нанесенные на носитель (трегер) с высокоразвитой активной поверхностью, например на оксид алюминия.

Благодаря своей простоте и высокой селективности по отношению к горючим газам термохимические преобразователи сыграли большую роль в создании инструментальных средств автоматического контроля взрывобезопасности атмосферы на предприятиях горнорудной, нефтехимической, газовой, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности. На их основе разработан большой арсенал приборов газового анализа для контроля дозрывоопасных концентраций горючих газов. Известны также попытки применения их для измерения предельно допустимых концентрации токсичных газов в атмосфере промышленных предприятий.

Большим преимуществом инструментальных средств измерения основанных на применении термохимических преобразователей, является их высокая надежность и простота обслуживания при длительной эксплуатации в условиях производства. Однако невысокая точность измерения, обусловленная влиянием сопутствующих газовых компонентов, параметров окружающей среды, ориентации датчика в пространстве и т. п., подверженность измерительных катализаторов отравлению каталитическими ядами — хлором, серой, фтором и их соединениями, ограниченный диапазон измерения, определяемый стехиометрией реакции окисления горючего газа, и другие факторы исключают возможность применения термохимических преобразователей для создания высокоточных прецизионных средств газового анализа.

3.1.2 Термокондуктометрический преобразователь

В термокондуктометрических преобразователях в качестве параметра преобразования используется теплопроводность среды, в которую они помещены,

зависящая от ее качественного и количественного состава.

Теплопроводность газов практически не зависит от давления и с достаточной для практики точностью может быть определена по уравнению:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \delta(t - t_0))$$

где

λ и λ_0 — теплопроводность газа при температурах t и t_0 .

Теплопроводность газовых смесей в известных пределах подчиняется закону аддитивности, в соответствии с которым можно записать:

$$\lambda_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i$$

где

λ_i и C_i — концентрация и теплопроводность i -го компонента полигазовой смеси. Из этого уравнения для бинарных смесей имеем:

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_1 C_1 + \lambda_2(1 - C_1)$$

3.1.3 Термоконвекционный преобразователь

В термоконвекционных преобразователях параметром преобразования является конвективная составляющая тепловых потерь терморезистора, которая, как известно из теории теплообмена, зависит от температуры поверхности терморезистора t и среды t_b , в которую он помещен; физических свойств газа, которые характеризуются коэффициентами вязкости ν , теплопроводности λ и температуропроводности α коэффициента объемного расширения газа β и ускорения силы тяжести g ; кроме того характер движения конвекционных потоков зависит от геометрических особенностей тела преобразователя, которые принято характеризовать его определяющим размером L . Таким образом, для конвективной составляющей теплообмена можно записать:

$$\alpha = f(t, t_b, \nu, \lambda, \alpha, \beta, g, L)$$

Термоконвекционные терморезисторные преобразователи обычно представляют собой один или несколько электрически изолированных нагревателей,

выполненных из металлической проволоки и находящихся в непосредственном тепловом контакте друг с другом, на которые нанесены один или несколько чувствительных элементов — термометров сопротивления. Для изготовления их обычно используется остеклованная проволока или проволока, покрытая тонким слоем термостойких лаков, что обеспечивает возможность создания непосредственного теплового контакта между нагревателями и термометрами и гальванической развязки их.

На основе термоконвекционных преобразователей разработаны многочисленные устройства автоматики и приборы для электрического измерения электрических и неэлектрических величин: устройства для измерения активной мощности, тока, напряжения, частоты и фазы переменного тока, датчики угловых и линейных перемещений, устройства для стабилизации тока и напряжения постоянного и переменного тока, удвоения частоты, модуляции, схемы для выполнения счетно-решающих операций и др.

3.1.4 Термосорбционный преобразователь

Принцип действия термосорбционных или полупроводниковых терморезисторных преобразователей основан на явлении изменения электрического сопротивления полупроводниковых материалов, обусловленного изменением их поверхностной проводимости под влиянием адсорбции молекул газа. Это явление объясняется тем, что при помещении полупроводникового элемента в газовую среду на его поверхности в результате существования свободной поверхностной энергии частиц на границе раздела адсорбируются молекулы газа, причем процесс адсорбции носит изотермический характер, обратим и увеличивается с ростом давления. При динамическом равновесии процессов сорбции, скорость которой зависит от концентрации свободных мест на поверхности адсорбента и концентрации молекул адсорбируемого газа, и десорбции можно записать:

$$\Gamma = \Gamma_m c / (c + d)$$

где

$d = \frac{k_2}{k_1}$; k_1, k_2 — константы адсорбционного и десорбционного процессов;

Γ, Γ_m — фактическое и максимальное (при котором поверхность полностью заменена молекулами поверхностно-активного вещества) значения адсорбции;

c — равновесная концентрация адсорбируемого вещества.

Уравнение показывает, что величина адсорбции на поверхности

полупроводникового материала зависит от концентрации адсорбционного вещества при данной температуре. Изменяя температуру полупроводника, можно существенным образом изменять величину адсорбции газа и тем самым варьировать чувствительность измерения газа на данном преобразователе.

Полупроводниковые преобразователи изготавливаются из полупроводников — германия и других металлов, а также из различных оксидов металлов — цинка, олова, титана, меди, марганца, ванадия, вольфрама и др. Преобразователь обычно представляет собой полупроводниковое тело той или иной формы, внутри которого расположены металлический нагреватель, подключенный к источнику электрического тока, и электрод, гальванически не связанный с нагревателем, между которыми измеряется сопротивление полупроводниковой массы. Широко применяются также пленочные пористые элементы, обладающие высоким быстродействием и возможностью измерения нескольких газов.

Термосорбционные преобразователи позволяют более успешно решать задачи селективного газового анализа. Так, ZnO , SnO и TiO_2 применяют для определения кислорода, Cu_2O , CuO — оксида углерода, MnO_2 — углекислого газа, V_2O_5 — сернистого ангидрида, NiO — закиси азота и т. п.

Преимуществами термосорбционных преобразователей перед преобразователями других видов являются простота конструкции и небольшие габариты, высокая чувствительность, большое быстродействие, низкое потребление энергии и, что самое главное, возможность измерения концентраций газов в широком диапазоне — от микро- до макроконцентраций. К их недостаткам следует отнести нелинейность характеристики преобразования, подверженность влиянию температуры и давления газа, нестабильность работы в длительном режиме и др.

3.2 Термохимический (термокаталитический) метод

Данный вид газоанализаторов является одним из наиболее распространенных средств анализа атмосферы окружающего воздуха и всевозможного вида технологических сред.

Термохимический метод газового анализа основан на беспламенном окислении горючих компонентов измеряемой среды с выделением тепла, которое является мерой концентрации горючих компонентов. Порог обнаружения или детектирования данного метода лимитируется только лишь чувствительностью технических средств измерения выделившегося тепла.

Инструментальная реализация данного метода - так называемый термохимический датчик, состоящий из двух терморезисторов прямого подогрева, поверхность одного из которых покрыта слоем катализатора (платина, палладий, платино-палладий). Роль катализатора сводится к снижению температуры окисления горючих компонентов. Например, на платиновом катализаторе беспламенное окисление водорода начинается со 180°C . Без катализатора окисление осуществляется при температуре больше 850°C . Как правило, терморезисторы выполняются идентичными по электрическим, геометрическим и теплофизическим параметрам. Роль терморезистора без катализатора сводится к компенсации влияния изменения параметров окружающей среды (температуры, влажности, давления). То есть, в термохимическом датчике реализован дифференциальный метод преобразования.

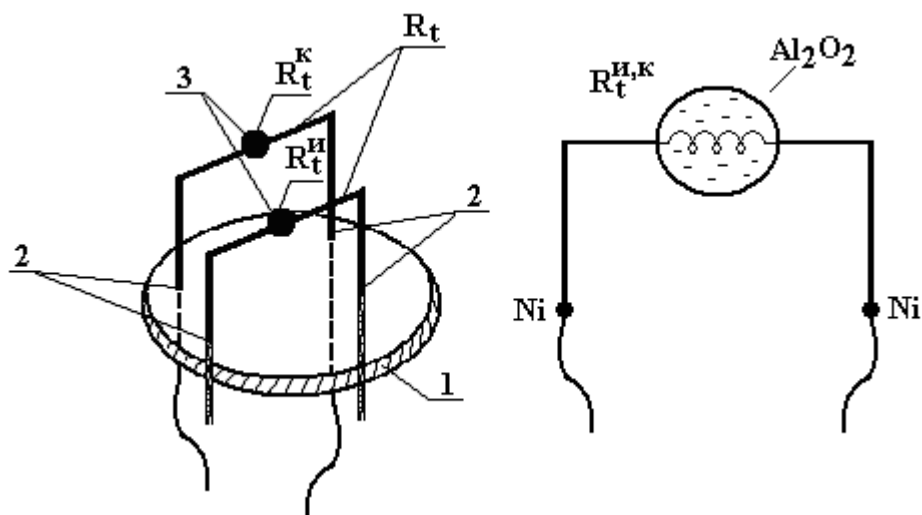


Рисунок 3.1 – Структура термохимического датчика

где 1– диэлектрическое основание, в котором укреплены никелевые держатели 2, к которым с одной стороны приварены выводы датчика, а с другой стороны – терморезисторы 3. Терморезисторы выполнены из платинового провода диаметром 30 мкм, который в середине свит в спираль, имеющую несколько витков диаметром 0,6÷0,7 мм. Эта спираль окуклена гаммаокисью алюминия. Диаметр полученного шарика – 0,8 мм. Измерительный шарик покрыт катализатором, и называется измерительным, а непокрытый – компенсационным. Данный датчик представляет собой так называемый диффузионный насос, сущность которого состоит в следующем. Процесс беспламенного окисления компонента формирует градиент концентрации между поверхностью измерительного элемента и окружающим воздухом как для горючих компонентов, так и для продуктов окисления.

В связи с этим к датчику всегда поставляются за счет диффузии новые порции горючих компонентов.

3.2.1 Уравнение теплового баланса термоэлементов прямого подогрева

Уравнение теплового баланса для преобразовательного элемента можно записать в следующем виде:

$$P_{эл} + P_x = \alpha (t - t_0),$$

где

$P_{эл}$ – электрическая мощность, выделяемая в терморезисторе за счет протекания электрического тока;

P_x – химическая мощность (или тепло), выделяемая за счет беспламенного окисления на поверхности терморезистора;

α – эффективный коэффициент теплообмена;

t – температура поверхности терморезистора;

t_0 – температура окружающего воздуха.

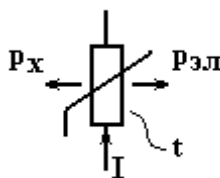


Рисунок 3.2 – Условное обозначение термохимического датчика

Эффективный коэффициент теплообмена зависит от площади теплообмена, степени ее черноты и формы тела терморезистора. Он учитывает как конвективную, так и теплопроводную составляющие теплообмена. В первом приближении необходимо считать, что α зависит от температуры поверхности терморезистора линейно, причем, примерно так же, как и сопротивление платиновой проволоки.

$$I^2 R t = \alpha (t - t_0 - t_x)$$

Поскольку условие для выделения тепла в результате окисления практически такое же, как и на поверхности, то

$$p_x = \alpha t_x,$$

где

t_x – эквивалентная температура, на которую увеличивается поверхность при окислении горючих компонентов.

$$t_x \equiv C_x$$

$$I^2 R_0 (1 + \beta t) = \alpha (t - t_0 - t_x)$$

$$\frac{I^2 R_0 (1 + \beta t)}{\alpha} = t - t_0 - t_x$$

$$\alpha = \alpha_0 F (1 + \gamma t)$$

$$\frac{R_0 (1 + \beta t)}{\alpha_0 F (1 + \gamma t)} = B$$

терморезистивный коэффициент, $\gamma = \beta$.

Тогда сопротивления измерительного и компенсационного элемента:

$$I^2 B_0 = t - t_0 - t_x \quad : R_{и}$$

$$I^2 B_0 = t - t_0 \quad : R_{к}$$

3.3 Измерительные схемы термохимического датчика

3.3.1 Мостовая, авторегуляторная, астатическая измерительные схемы

Измерительные преобразователи на основе мостовых схем с включением ИЭ и КЭ в одну из ветвей моста получили наибольшее распространение. Это - как правило, мосты, питаемые напряжением, либо мосты, питаемые током [16]. На основе этих схемных решений реализуются элементы газоаналитических систем контроля рудничной атмосферы и взрывоопасных производств. В простейшем виде это шахтные метанометры и сигнализаторы нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Схема измерительного моста, показана на рисунке 3.3.

Измерительный мост образован резисторами: R_1 , R_2 , $R_{И}$, $R_{К}$, где $R_{И}$ и $R_{К}$ – сопротивление ИЭ и КЭ соответственно, причем значения сопротивлений R_1, R_2 , R много больше $R_{И}$, $R_{К}$. В измерительную диагональ моста включен индикатор разбаланса в виде милливольтметра mV , а питающая диагональ подключена к источнику напряжения E . Резистор R служит для балансировки измерительного моста.

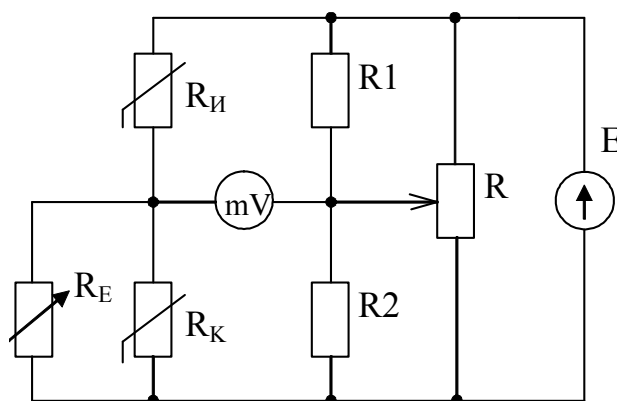


Рисунок 3.3 – Схема измерительного моста

Резистор R_E включенный параллельно КЭ подбирается к каждому экземпляру ТХД. Его функция – повышение компенсирующих свойств схемы при измерении напряжения питания. Резисторами R_E и R добиваются минимального напряжения в измерительной диагонали в отсутствии измеряемых компонентов при различном напряжении питания, изменяющимся от номинального на 10%. При наличии измеряемых компонентов

сопротивление $R_{И}$ возрастает, что приводит к увеличению разбаланса в измерительной диагонали.

Наряду с мостами, питаемыми напряжением, в практике с использованием ТХД получили распространение мостовые схемы, питаемые током. Это измерительные средства для обеспечения искровзрывобезопасности и работы ТХД на значительном удалении от измерительного преобразователя. Это актуально, когда в качестве объекта управления выступает рудничная атмосфера с высокими концентрациями ГК и малым диапазоном изменения температуры ИС. На рисунке 3.4 представлена схема включения ТХД положенная за основу сигнализаторов СТХ-3, СВК-3М1.

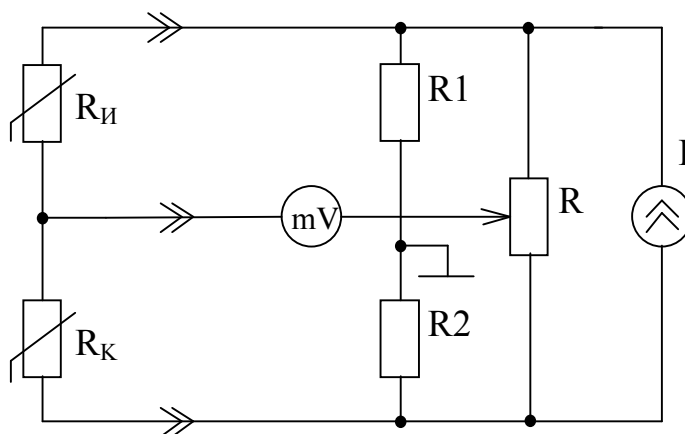


Рисунок 3.4 – Измерительная схема включения ТХД, питаемого током

Работает схема следующим образом. Если значения сопротивлений R_1 и R_2 много больше значений $R_{И}$ и $R_{К}$, то весь ток протекает по элементам ТХД. В отсутствие ГК с использованием резистора R в измерительной диагонали устанавливается минимальный сигнал. При наличии ГК возрастает сопротивление $R_{И}$, что приводит к увеличению разбаланса напряжения измерительной диагонали, значение которого пропорционально концентрации ГК.

В отличие от мостовых схем, питаемых напряжением, где падение напряжения на полуэлементах ТХД с изменением температуры практически не изменяется, в рассмотренных схемах происходит значительное изменение напряжения. Это обусловлено тем, что при изменении температуры ИС изменяется сопротивление ИЭ и КЭ, что при неизменном токе приводит к изменению падения напряжения на них.

Обобщая, по измерительному преобразователю ТХД с компенсацией влияния изменения температуры ИС, можно отметить следующее:

- измерительные преобразователи на основе мостовых схем нашли

широкое применение при измерении средних уровней концентраций (1...5 об.%) и при незначительной вариации температуры ИС (± 20 °С);

- повысить чувствительность и расширить рабочий температурный диапазон возможно только при использовании более совершенного датчика;

- технические решения, связанные с перераспределением токов, являются трудоемкими и позволяют незначительно увеличить чувствительность при сохранении прежнего температурного диапазона;

- при вариации температуры ИС происходит изменение положения рабочей точки ИЭ на плато S-образной характеристики в области диффузионного окисления и тем самым изменяется крутизна преобразования датчика.

Для уменьшения дополнительных погрешностей от изменения температуры ИС и стабилизации положения рабочей точки в области диффузионного окисления применяют ИП со стабилизацией поверхности элемента ТХД:

- компенсационного;
- измерительного;
- компенсационного и измерительного.

В связи с тем, что размеры ИЭ и КЭ крайне малы, а теплопроводность γ -оксида алюминия значительна, принято считать, что температура поверхности КЭ и ИЭ практически совпадает с температурой платиновой проволоки (платинового термоэлемента). Если поддерживать сопротивление термоэлементов постоянным, то и температура поверхности будет неизменной. В связи с этим изменение температуры ИС меньше скажется на погрешностях датчика и рабочая точка в области диффузионного окисления будет застabilизирована.

При идентичности элементов ТХД, поддерживая температуру КЭ на заданном уровне, можно считать что и температура ИЭ будет находиться на том же уровне (в отсутствии горючих компонентов).

При изменении температуры окружающего воздуха будет изменяться ток, протекающий через КЭ таким образом, чтобы оставить его сопротивление неизменным. При этом сопротивление ИЭ будет совпадать с сопротивлением КЭ.

При появлении горючих компонентов на поверхности ИЭ происходит выделение тепла и сопротивление его растет. Разность сопротивлений оказывается пропорциональной концентрации горючих компонентов.

3.3.2 Схема со стабилизацией температуры компенсационного элемента

Широкое распространение получили ИПТХД на основе авторегуляторной схемы поддержания температуры КЭ ТХД постоянной. Это позволяет уменьшить влияния температуры измеряемой среды на результат измерения. На рисунке 3.5 представлена структурная схема сигнализатора со стабилизацией температуры КЭ.

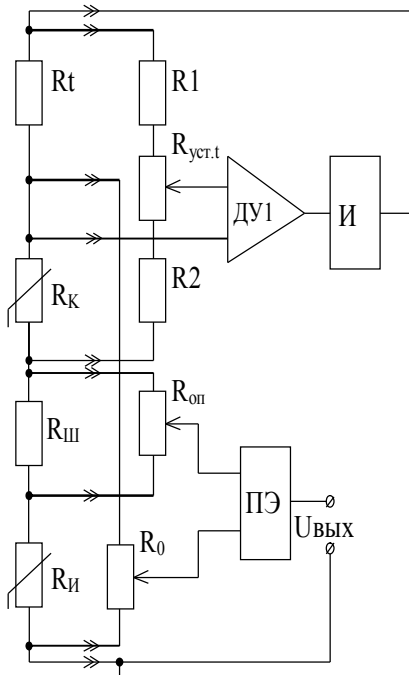


Рисунок 3.5 – Структурная схема сигнализатора со стабилизацией температуры КЭ

Данная схема образована следующими элементами: R_t , R_k , R_1 , R_2 , $R_{уст.т}$ (резистор уставки температуры поверхности КЭ), ДУ1 (дифференциальный усилитель), И (интегрирующая цепь).

Эти составляющие позволяют стабилизировать температуру поверхности КЭ.

Однако рассмотренные схемы включения ТХД из-за не идентичности электрических и теплофизических параметров элементов последних подвержены влиянию температуры ИС.

3.3.3 Схема преобразователя со стабилизацией температуры ИЭ

В ряде технических решений стабилизируется температура ИЭ. Один из

вариантов измерительной схемы такого преобразователя представлен на рисунке 3.6.

Схема содержит мостовой авторегулятор, включающий в себя резисторы $R_1...R_3$, $R_{И}$, усилитель ДУ и измерительный мост в составе резисторов $R_4...R_6$, $R_{К}$.

Недостатком данного технического решения можно отнести изменение чувствительности от температуры ИС.

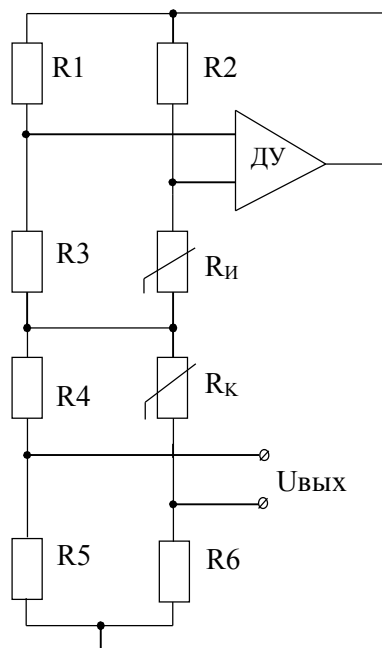


Рисунок 3.6 – Измерительная схема преобразователя со стабилизацией температуры ИЭ

3.3.4 Схема преобразователя со стабилизацией температур поверхностей ИЭ и КЭ

Известно техническое решение в котором поддерживается температура поверхности неизменной как ИЭ, так и КЭ. Его схема представлена на рисунке 3.7.

Данный измерительный преобразователь имеет следующие функциональные узлы:

- авторегуляторная мостовая схема поддержания температуры поверхности ИЭ по постоянному току, образованная следующими элементами: R_1 , R_2 , R_3 , $R_{И}$, ДУ1);
- авторегуляторная мостовая схема поддержания температуры поверхности КЭ по постоянному току, образованная следующими

элементами: R4, R5, R6, R_к, ДУ2);

- генератор переменного напряжения Г; -дифференциальный усилитель выходного сигнала ДУ3 по переменному току.

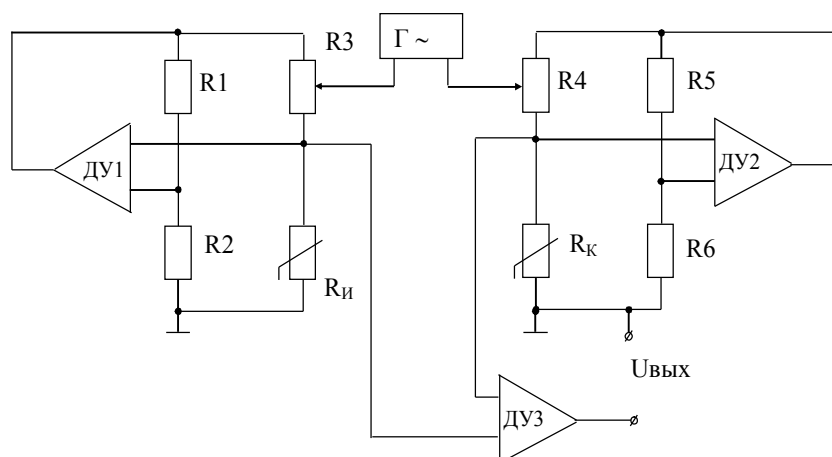


Рисунок 3.7 – Измерительная схема преобразователя со стабилизацией температур поверхностей ИЭ и КЭ

Данное техническое решение позволяет повысить чувствительность измерительной схемы включения ТХД за счет формирования сигнала на переменном токе, однако ему также свойственна дополнительная погрешность от изменения температуры ИС, обусловленная несовершенствами ТХД.

Каждому из рассмотренных выше технических решений со стабилизацией температуры элементов ТХД присущи недостатки в виде дополнительной погрешности, определяемой неидентичностью электрических, теплофизических параметров элементов ТХД.

3.3.5 Схема преобразователя с термостатированием по дополнительному термоэлементу

Известно схемное решение с каналом измерения температуры ИС по дополнительному термоэлементу . Структурная схема ИП представлена на рисунке 3.8.

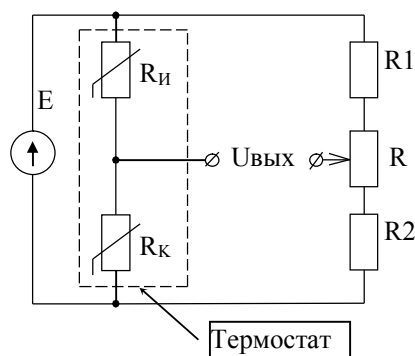


Рисунок 3.8 – Структурная схема преобразователя с термостатированием по дополнительному термоэлементу

Мостовая схема питается постоянным напряжением, при этом ТХД помещен в термостат, температура которого поддерживается в диапазоне 400...500°C по дополнительному термоэлементу, в качестве которого используется термопара.

3.4 Использование термоэлементов прямого подогрева

Температурная зависимость электрического сопротивления терморезисторных преобразователей под воздействием внешней среды позволяет измерять те или иные ее параметры. Эти преобразователи, как правило, состоят из нагревателя, питаемого от электрического источника тока, и чувствительного (измерительного) элемента — термометра, служащего для определения температуры преобразователя в процессе измерения, которые находятся в непосредственном тепловом контакте друг с другом. Они могут содержать также некоторое промежуточное тело — носитель, каркас, слой термостойкой электроизоляции и т. п., участвующее в процессе преобразования или обеспечивающее кондуктивную передачу тепла с нагревателя на термометр. Нагреватель и термометр преобразователя могут также находиться в термоконвективной связи, не имея физического контакта друг с другом. В различных конструкциях терморезисторных преобразователей те или иные элементы могут отсутствовать, но неизменным условием определения данного вида преобразователей является наличие в них металлического элемента, нагреваемого от электрического источника тока.

В зависимости от принципа действия, определяемого характером теплового взаимодействия между преобразователем и анализируемой средой, терморезисторные преобразователи могут быть разделены на следующие виды: термоанемометрические, калориметрические, термохимические,

термокондуктометрические, термоконвекционные и термосорбционные (полупроводниковые).

3.4.1 Измерение скорости потока, расхода, давления и плотности

Термоанемометрический терморезисторный преобразователь

Принцип действия термоанемометрических терморезисторных преобразователей основан на изменении теплового состояния нагретой электрическим током металлической нити при обдувании ее потоком газа.

Высокая точность преобразования, простота конструкции и большое быстродействие термоанемометрических преобразователей обусловили их широкое применение в экспериментальной технике и при гидродинамических исследованиях для определения скорости расхода газов: они также широко используются при градуировке расходомеров других типов.

Для тех же целей в технике измерения используются термоанемометрические преобразователи в виде термопар с косвенным подогревом и подогреваемые полупроводниковые термосопротивления — термисторы.

К недостаткам термоанемометрических преобразователей следует отнести их малую прочность и невысокую надежность работы в промышленных условиях; невозможность измерения больших скоростей, так как чувствительность их падает с увеличением диапазона измерения; чувствительность к дестабилизирующим факторам — температуре, давлению, составу газа и др.

Калориметрический терморезисторный преобразователь

Работа калориметрических терморезисторных преобразователей, как и термоанемометрических, основана на зависимости их теплового состояния от скорости или расхода измеряемого газового потока, однако они отличаются от последних отсутствием непосредственного контакта между нагревателем и измерительным элементом. Калориметрический терморезисторный преобразователь представляет собой два теплоприемника, расположенные до и после нагревателя по ходу движения анализируемого газа, которые включены дифференциально; следовательно, теплоприемник, расположенный до нагревателя, соприкасается с газом в холодном состоянии, а теплоприемник, расположенный после нагревателя, — с нагретым газом, поэтому мерой

скорости или расхода газа для этих преобразователей является интенсивность переноса тепла, проявляющаяся в степени нагрева термометра, расположенного за нагревателем. Благодаря такому выполнению преобразователя удается существенно повысить его автокомпенсационные свойства в части устранения влияния на результат измерения таких параметров газа, как состав, температура, давление, влажность и др.

Зависимость мощности нагрева и соответственно температуры теплоприемника от расхода газа в калориметрических преобразователях выражается уравнением:

$$P_H = kG_M c_p \Delta t$$

где

G_M — массовый расход газа;

Δt — разность температур теплоприемников.

Уравнение не может служить в качестве расчетного для определения статической характеристики калориметрических преобразователей, однако из него очевидно, что при мощности нагревателя $P_H = \text{const}$ разность температур термометров зависит от массового расхода газа.

Калориметрические преобразователи применяются главным образом в научных исследованиях — в аэродинамике, гидравлике, энергомашиностроении и других областях техники. Они обладают небольшой инерционностью и малой погрешностью, но недостаточно прочны. Последнее свойство исключает возможность применения их в производственных условиях. Чаще всего они применяются для измерения расхода различных газов.

Разновидностью калориметрических преобразователей являются неконтактные преобразователи, отличающиеся от рассмотренных выше отсутствием прямого контакта нагревателя и измерительных термометров с анализируемой средой. Эти преобразователи накладываются на внешнюю поверхность трубопровода, по которому протекает анализируемый газ или жидкость. Они более надежны в эксплуатации и применяются в промышленных условиях для измерения расхода газов, жидкостей и жидких металлов.

3.4.2 Использование термохимического датчика для анализа отходящих дымовых газов в теплоэнергетических установках

Для эффективного и качественного сжигания топлива в котельных агрегатах должно быть точно сбалансировано соотношение воздух/топливо. Недостаток воздуха при горении вызывает неполное сгорание и, как следствие, перерасход топлива. Также образующиеся в дымовом газе несгоревшие компоненты топлива могут привести к взрыву. Избыток воздуха также приводит к перерасходу топлива на нагрев лишнего воздуха в составе отходящих газов. В обоих случаях сжигание топлива сопровождается повышенным выбросом в атмосферу высокотоксичных газов.

Оптимальное соотношение воздух/топливо зависит от качества топлива и воздуха (давления, температуры, влажности и т.д.). Использование стационарных термохимических датчиков для анализа отходящих дымовых газов позволяет контролировать соотношение воздух/топливо, что минимизирует время неоптимальной работы котла и гарантирует низкое количество содержания вредных выбросов.

Газоанализаторы отходящих газов предназначены для:

- а) анализа состава отходящих дымовых газов на содержание кислорода O_2 , оксида углерода CO , диоксида углерода CO_2 , оксида азота NO , диоксида азота NO_2 , диоксида серы SO_2 , сероводорода H_2S ;
- б) определения коэффициента избытка воздуха - λ ;
- в) управления приводом подачи воздуха для поддержания оптимального расхода топлива.

4 ПОМЕХИ ОБЩЕГО И НОРМАЛЬНОГО ВИДА

4.1 Основные причины появления помех общего и нормального видов на примере электромагнитных датчиков, термохимических преобразователей и термоэлектрических преобразователей

В общем виде под помехами понимают любые факторы, искажающие результаты измерения. Далее под помехами подразумеваются паразитные сигналы, действующие на входе измерительного преобразователя (ИП) наряду с полезным сигналом – напряжением постоянного тока.

Источниками помех могут быть электромагнитные наводки, термоЭДС, токи утечки, протекающие по распределенным сопротивлениям изоляции, и другие явления. Отмеченные источники возникают непосредственно во входном контуре ИП.

На рис. 4.1 представлен источник помехи иного вида. ИП измеряет напряжение постоянного тока U , создаваемое термопарой ТП, приваренной к нагревателю Н, по которому протекает переменный ток i . Нижний конец Н и корпус ИП заземлены. ИП должен иметь симметричный вход (ни один из входов не соединён с корпусом). В данном случае точка соединения термопары с нагревателем находится под определенным потенциалом φ относительно земли. При этом распределённые сопротивления и ёмкости изоляции (показаны пунктиром) между корпусом ИП и входами. А, В не могут быть одинаковыми. Поэтому токи утечки I_1, I_2 , создаваемые напряжением U не равны, что приводит к появлению разности напряжений U_{AB} . Эта разность потенциалов является паразитным сигналом, действующим во входном контуре ИП. т.е. напряжение U , хотя и не действует непосредственно во входной цепи ИП, но частично «проникает в него».

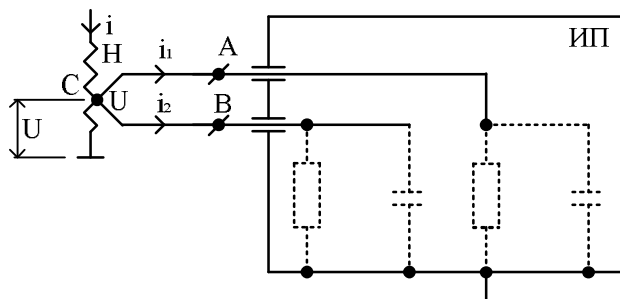


Рисунок 4.1 – Пример источника помех общего вида.

4.2 Способы оценки помехозащищенности измерительных преобразователей. Коэффициенты подавления помех общего и нормального видов, эффективный коэффициент помехозащищенности

Для оценки влияния помех, используются эквивалентные схемы в которых элементы с распределенными параметрами заменяют сосредоточенными, а всю совокупность источников помех заменяют двумя (рис.4.2). Это ЭДС помехи нормального вида $E_{н.в.}$ и ЭДС помехи общего вида $E_{о.в.}$. В дальнейшем будем рассматривать помехи постоянного тока и синусоидальные, имея в виду, что периодический сигнал может быть представлен в виде суммы гармоник. Среди синусоидальных помех наибольший интерес представляют помехи сетевой частоты.

Представим $E_{н.в.}$ в виде суммы помех: $\bar{E}_{н.в.}$ и $\tilde{E}_{н.в.}$ - соответственно постоянного тока и синусоидальной ЭДС. Составляющая $\bar{E}_{н.в.}$ неотличима от полезного напряжения U . Различные схемные способы направлены на защиту от $\tilde{E}_{н.в.}$, их называют способами защиты от помехи нормального вида. Однако какие бы не применялись способы, некоторое влияние $\tilde{E}_{н.в.}$ остается.

Степень защищенности ИП от $\tilde{E}_{н.в.}$ характеризуют коэффициентом подавления синусоидальной помехи нормального вида, выражаемого в дБ.

$$\tilde{K}_{н.в.} = 20 \lg \frac{E_{н.в.м}}{|\Delta U|},$$

где

$E_{н.в.м}$ – амплитуда синусоидальной ЭДС помехи нормального вида; ΔU – изменение показаний ИП, вызванное этой помехой.

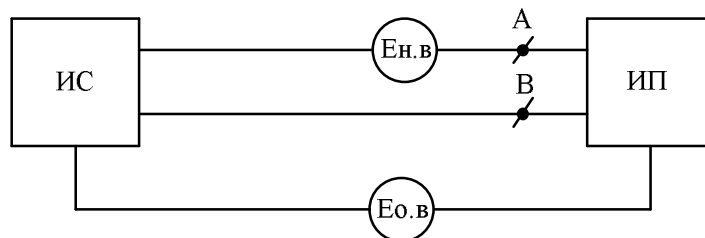


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема, отражающая наличие помех нормального $E_{н.в.}$ и общего $E_{о.в.}$ видов, ИС – источник изменяемого сигнала.

При краткой характеристике защищенности ИП от $E_{н.в.}$ дается значение $\tilde{K}_{н.в.}$, только на одной частоте, как правило сетевой. При более полной характеристике дается частная зависимость $\tilde{K}_{н.в.}(f)$.

ЭДС помехи общего вида влияет на показания ИП лишь постольку, поскольку некоторая ее доля $E'_{о.в.}$ проникает во входную цепь ИП. Способы, направленные на уменьшение отношения $E'_{о.в.}/E_{о.в.}$ называют способами защиты от помех общего вида.

Электродвижущие силы $E_{о.в.}$ и $E'_{о.в.}$ можно, как и раньше, представить в виде составляющих $\bar{E}_{о.в.}$, $\tilde{E}_{о.в.}$, $\bar{E}'_{о.в.}$, $\tilde{E}'_{о.в.}$. Степень защищенности ИП от помех общего вида характеризуют двумя коэффициентами подавления помех общего вида.

$$\bar{K}_{о.в.} = 20 \lg \frac{\bar{E}_{о.в.}}{\bar{E}'_{о.в.}},$$

$$\tilde{K}_{о.в.} = 20 \lg \frac{\tilde{E}_{о.в.}}{\tilde{E}'_{о.в.}}$$

Электродвижущая сила $\bar{E}_{о.в.}$, перешедшая во входную цепь, неотличима от полезного сигнала – напряжения постоянного тока U – и вызывает изменение показаний ИП на некоторую величину ΔU , поэтому $\bar{K}_{о.в.}$ можно записать в следующем виде:

$$\bar{K}_{о.в.} = 20 \lg \frac{\bar{E}_{о.в.}}{|\Delta U|}$$

ЭДС $\tilde{E}'_{о.в.}$, перешедшая во входной контур, действует в нем так же, как $\tilde{E}_{н.в.}$. Поэтому если в ИП использовать какой либо способ защиты от помех нормального вида $\tilde{E}_{н.в.}$, то он в равной мере относится и к помехе общего вида $\tilde{E}'_{о.в.}$, перешедшей в него. Т.е. $\tilde{E}'_{о.в.}$ может дополнительно подавляться, а изменение показаний ΔU , которое она вызывает, определяется $\tilde{K}_{н.в.}$. В связи с этим вводят еще один коэффициент, называемый эффективным коэффициентом подавления синусоидальных помех общего вида:

$$\tilde{K}_{о.в.эфф} = 20 \lg \frac{E_{о.в.т}}{|\Delta U|},$$

где

$E_{o.v.m}$ – амплитуда синусоидальной ЭДС помехи общего вида; ΔU – изменение показаний ИП, вызванное действием этой помехи.

Представив

$$\frac{E_{o.v.m}}{\Delta U} = \frac{E_{o.v.m}}{E'_{o.v.m}} \cdot \frac{E'_{o.v.m}}{\Delta U},$$

можно записать

$$\tilde{K}_{o.v.эфф} = \tilde{K}_{o.v.} + \tilde{K}_{н.в.}$$

При краткой характеристике защищённости ИП от помех общего вида приводится $\tilde{K}_{o.v.}$ на одной частоте, как правило сетевой, и значение $\bar{K}_{o.v.}$. При более полной характеристике – частотная зависимость $\tilde{K}_{o.v.}(f)$ (или $\tilde{K}_{o.v.эфф}(f)$).

В последнем случае

$$\tilde{K}_{o.v.} = \tilde{K}_{o.v.}(0) = \tilde{K}_{o.v.эфф}(0)$$

4.3 Способы защиты от помех. Симметричный вход. Гальваническое разделение. Фильтрация.

4.3.1 Симметричный вход

Под симметричным входом ИП подразумевают такой вход, когда входные зажимы изолированы от корпуса (в отличие от осциллографа, в котором один из входов соединён с корпусом прибора). Иногда такой вход называют «плавающим» (потенциал входного контура относительно корпуса изменяется, «плавает»).

На рис. 4.3 R_{AF} , R_{BF} отображают распределённые сопротивления изоляции, C_{AF} , C_{BF} – распределённые ёмкости между корпусом ИП (точка F) и его входными зажимами (точки A и B). ЭДС полезного сигнала и помехи нормального вида не показаны. Помеха общего вида представлена ЭДС $\tilde{E}_{o.v.}$. Корпус источника ИИ (точка D) может быть соединён с любой точкой его схемы, поэтому выходное сопротивление $R_{вых}$ разделено на две части $R_{вых1}$, $R_{вых2}$. Сопротивления проводов линии связи обозначены r_1 , r_2 .

Поскольку вход ИП симметричный точка В не соединена с корпусом (точкой F), во входной контур будет проникать лишь часть $\tilde{E}_{O.B.}$, причём малая, поскольку R_{BF} велико, а C_{BF} мала. В соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1) требуется найти $K_{O.B.}(f)$ – коэффициент подавления помехи общего вида $\tilde{E}_{O.B.}$. Схему, представленную на рис. 4.3 можно изобразить в более удобном для анализа виде (см. рис. 4.4.a). В диагонали АВ моста AFBD может оказаться нулевое напряжение, т.е. $\tilde{E}_{O.B.}=0$.

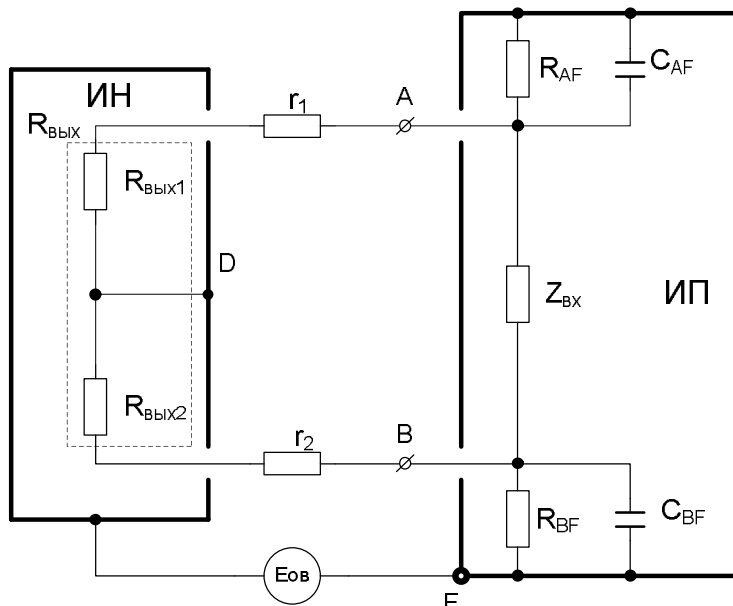


Рисунок 4.3 – Использование симметричного входа в ИП

Но этот случай маловероятен. Будем ориентироваться на наихудший случай – случай наибольшего разбаланса моста. Обычно $R_{AF} > R_{BF}$, $C_{AF} < C_{BF}$, потому, что зажим В соединён с общей точкой схемы ИП и эта «точка» имеет геометрические размеры, значительно превышающие размеры той части схемы, которая соединена с зажимом А. Следовательно, разбаланс моста (рис. 4.4.a) будет тем больше, чем больше, чем меньше $R_{вых1}$ и r_1 ; в пределе – при короткой линии связи ($r_1=0$) и при соединении корпуса ИП с крайней точкой $R_{вых}$ ($R_{вых1}=0$). Таким образом, можно принять (на наихудший случай) $R_{вых2}=R_{вых}$; $r_1=r_2$; $R_{вых1}=0$.

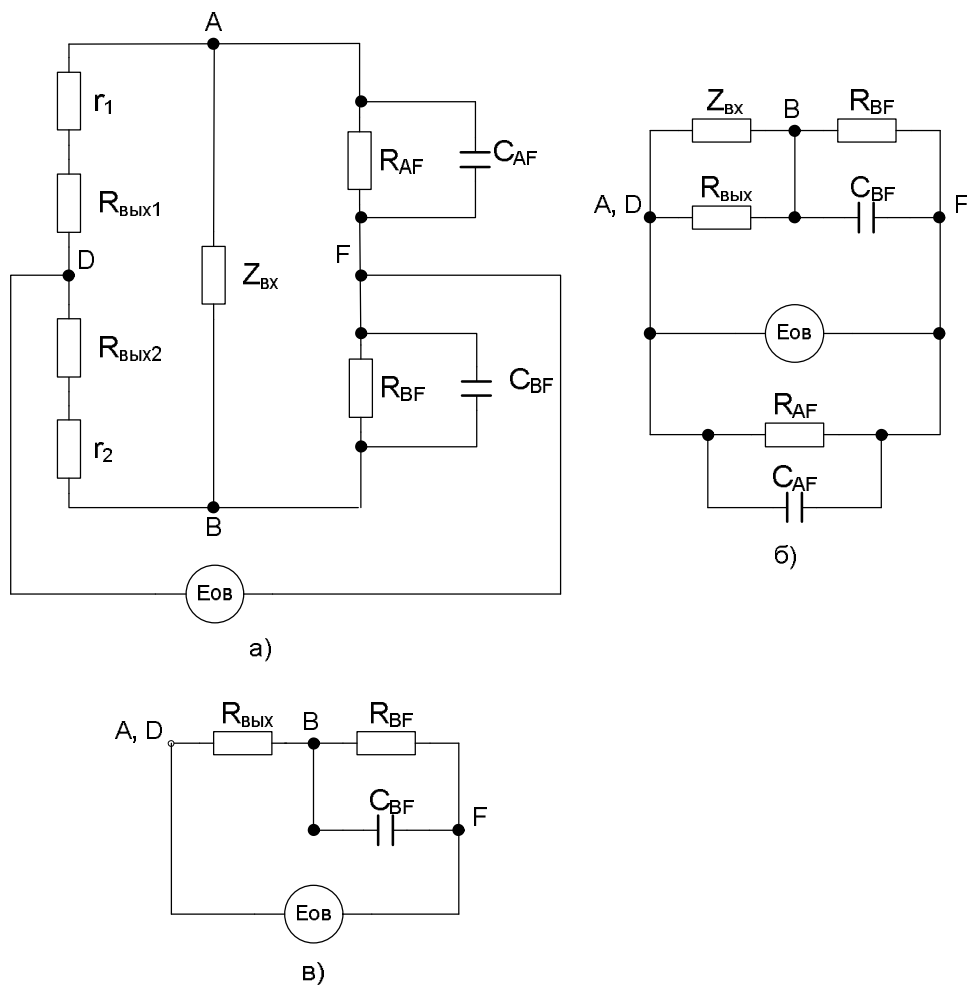


Рисунок 4.4 – Эквивалентные схемы ИП с симметричным входом в условиях действия помех общего вида $E_{O.B.}$. а) – полная, б) – упрощённая.

В этом случае точки A и D совмещаются, и мост вырождается в более простую схему, представленную на рис. 4.4.б. Учитывая, что $Z_{вх} \gg R_{вых}$, эту схему можно ещё упростить (отбрасывая R_{AF} , C_{AF} поскольку они подсоединены параллельно $\tilde{E}_{O.B.}$). Данная схема представлена на рис.4.4.в. Разность напряжений между точками A и B – это и есть доля помехи общего вида $\tilde{E}_{O.B.}$, прошедшая во входной контур ИП $\tilde{E}'_{O.B.}$.

С учётом малости $R_{вых}$, можно записать:

$$\tilde{E}'_{O.B.} = \tilde{E}_{O.B.} \frac{R_{вых}}{R_{BF}} \sqrt{1 + (\omega\tau_{BF})^2},$$

где

$$\tau_{BF} = R_{BF} \cdot C_{BF}.$$

Тогда $K_{O.B.}$ имеет вид:

$$K_{O.B.} = 20 \lg \frac{\tilde{E}_{O.B.}}{\tilde{E}'_{O.B.}} = 20 \lg \frac{R_{BF}}{R_{ВЫХ}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{BF})^2}}$$

Для построения зависимости $K_{O.B.}(f)$ выделяют участки, когда $(\tau_{BC})^2 \gg 1$, $(\tau_{BF})^2 \gg 1$.

Тогда

$$K_{OB} = \bar{K}_{OB} = 20 \cdot Lg \frac{R_{BF}}{R_{A\dot{U}\dot{O}}}$$

$$K_{OB} = \bar{K}_{OB} - 20 \cdot Lg w \cdot \tau_{BF} = 20 \cdot Lg \frac{1}{w \cdot R_{ВЫХ} \cdot C_{BF}}$$

Согласно ГОСТ14014-81 Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие технические условия. Сопротивление $R_{ВЫХ}$ принято задавать равным 1 кОм. Значение R_{BF} нетрудно обеспечить на уровне 0,1 ÷ 10 гОм, $C_{BF} = 0,1 \div 10$ нФ. Примем $R_{BF} = 1$ гОм, $C_{BF} = 1$ нФ.

Тогда

$$\bar{K}_{OB} = 20 \cdot Lg 10^6 = 120 \text{ дБ.}$$

$$K_{OB}(50 Гц) \approx 70 \text{ дБ.}$$

Такое подавление в большинстве случаев оказывается недостаточным.

4.3.2 Сочетание симметричного входа с экранированием.

Корпус ИП играет роль экрана \mathcal{E}_1 . Часть элементов схемы ИП (по крайней мере, входной усилитель) помещена во внутренний экран \mathcal{E}_2 , электрически изолированный от \mathcal{E}_1 , R_{CF} , C_{CF} отражают распределенные сопротивления и емкость изоляции между экранами \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Экран \mathcal{E}_2 соединен с экраном \mathcal{E}_3 , в котором находится провода линии связи r_1 и r_2 . Сопротивление экрана \mathcal{E}_3 – r_3 . Таким образом, ИП имеет трехзажимный вход ABC (H_i , L_o , G_u – высокий, низкий, защита). Схему можно представить в более удобном виде, представленном на рис. 4.5 Схема содержит три полумоста ADB, ACB, ФАИ и делитель напряжения с низкоомным плечом r_3 . Обратный полумост AFB и определяет разность потенциалов точек А и В для моста ABCD, а затем, наоборот, отбросим полумост ACB и определим ту же разность потенциалов

для моста AFBD. Можно заметить, что при отбрасывании полумоста AFB оставшаяся часть схемы отличается от уже рассмотренной только тем, что K_{OB} приложено к диагонали не непосредственно, а через делитель напряжения с элементами r_3 , C_{CF} , R_{CF} . Поэтому остаются в силе все рассуждения, которые привели к упрощению схемы, представленной на рис. 4.6.а. В результате получаем схему представленную на рис. 4.6.б. Она представляет собой двухступенчатый делитель напряжения. С учетом малости $R_{вых}$, r_3 можно получить:

$$K_{O.B.} = 20 \cdot Lg \frac{R_{BE} \cdot R_{CF}}{R_{BВЫХ} \cdot r_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (w \cdot \tau_{BC})^2} \cdot \sqrt{1 + (w \cdot \tau_{CF})^2}},$$

где

$$\tau_{BC} = R_{BC} \cdot C_{BC} ; \tau_{CF} = R_{CF} \cdot C_{CF}.$$

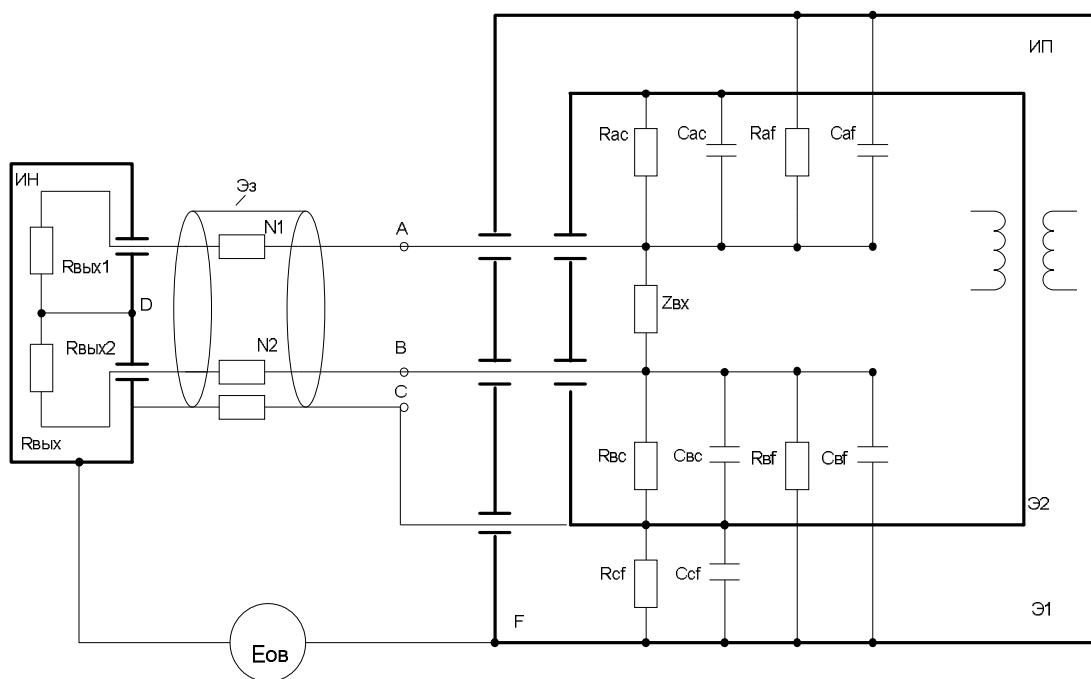


Рисунок 4.5 – Использование симметричного входа совместно с защитным экранированием

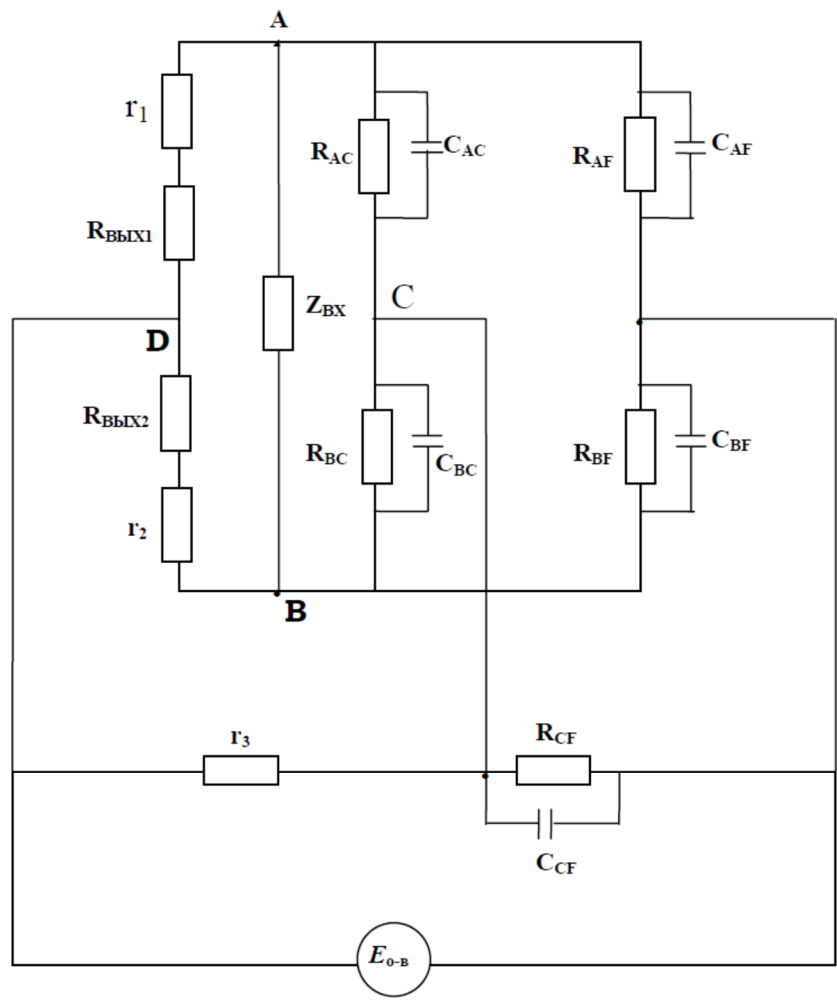
Для приближенного расчета положим $R_{BC} = R_{CF} = 1$ гОм, $C_{BC} = C_{CA} = 1$ нФ, тогда в соответствии с последней формулой

$$K_{OB} = 20 \cdot Lg 10^{15} = 300 \text{ дБ.}$$

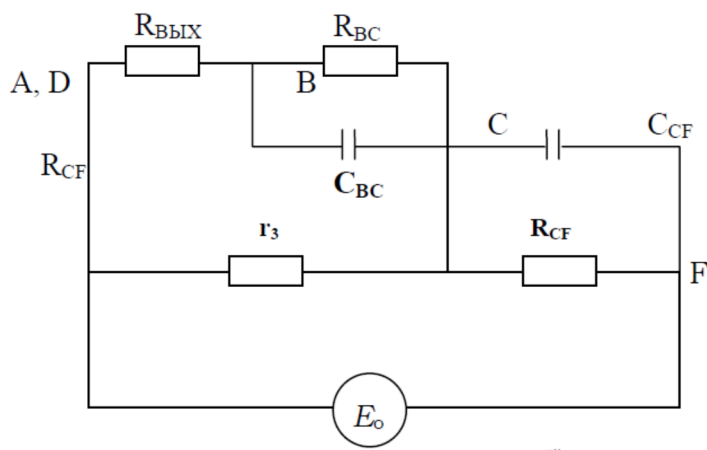
$$K_{OB}(50 \text{ Гц}) = 200 \text{ дБ.}$$

Отбросим в схеме рис. 4.5.а. полумост ABC, тогда получается схема полностью совпадающая с показанной на рис. 4.4.а. и соответственно сводящаяся к схеме рис. 4.4.в. Но есть существенное количественное различие: в схеме на рис. 4.5 значения R_{BF} и C_{BF} гораздо больше чем в схеме на рис. 4.3. Это так называемые проходные сопротивления и емкость, обусловленные не идеальностью экранирования трансформатора источника питания. Примем ориентировочного расчета, что R_{BF} и C_{BF} отличаются от R_{BC} , R_{CF} и C_{BC} и C_{CF} на два порядка: $R_{BF} = 100$ гОм, $C_{BF} = 10$ пФ. Тогда в соответствие выражениям для $K_{ОВ}$ для схемы на рис. 2.в. можно найти $K_{ОВ} = 160$ дБ, $K_{ОВ}(50 \text{ Гц}) = 110$ дБ.

Таким образом двухступенчатый делитель (см. рис. 4.5.б.) столь сильно уменьшает влияние R_{BC} , C_{BC} и R_{CF} , C_{CF} , что коэффициент подавления определяется не ими, а R_{BF} , C_{BF} . Эффект увеличения помехозащищенности в схеме с замкнутым экранированием обусловлен тем, что в ней R_{BF} значительно больше, а C_{BF} значительно меньше.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Эквивалентные схемы ИП с симметричным входом и защитным экранированием: а) полная, б) упрощенная

4.3.3 Фильтрация

Если полезный сигнал представляет собой медленно изменяющееся напряжение (как в случае с термопарой), целесообразно проводить ослабление помех общего и нормального видов сетевой частоты применив фильтр нижних частот.

Для расчета фильтра нижних частот необходимо определить его коэффициент подавления на частоте помехи ($f = 50$ Гц, $\omega = 314$ с⁻¹).

Необходимо обеспечить, чтобы доля пульсации выходного напряжения от максимального полезного была меньше, чем основная погрешность δ . В пересчете ко входному напряжению можно записать

$$K_{\Pi} \geq \frac{E_{н.в\max}}{I_0 R_0 \alpha (t_2 - t_1) \delta} = \frac{1 \cdot 1,4}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-3}} = 83 \cdot 10^3.$$

Зададимся коэффициентом подавления $90 \cdot 10^3$, тогда оптимальное число звеньев пассивного фильтра НЧ можно определить следующим образом:
 $n = 0,5 \ln K_{\Pi} = 0,5 \ln 90000 = 5,7 = 6$.

$$\left(\frac{1}{10RC} \right)^6 = \frac{1}{90000},$$

следовательно

$$RC = \sqrt[6]{90000} / 314 = 0,02 \text{ с.}$$

Зададимся значением $C = 1 \text{ мкФ} \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, получаем $R = 20 \text{ кОм}$. Целесообразно ФНЧ разбить на два. Несколько каскадов расположить на входе, перед ДУ и ВУ, а оставшиеся после ДУ. Для определения числа каскадов, располагаемых на входе, руководствуются тем, что от датчика $E_{н.в}$ ДУ не должен насыщаться. Задаваясь превышением напряжения ΔU ДУ относительно $U_1(t_2) \cdot K_{yc}$ можно записать

$$K_{\Pi 1} \geq \frac{E_{н.в\max} \cdot K_{yc}}{\Delta U} = \frac{E_{н.в\max} \cdot K_{yc}}{U_{ДУ\max} - U_1(t_2)} = \frac{1,4 \cdot 250}{3} = 116$$

или

$$(\omega RC)^n \geq 116,$$

$$n \geq \frac{\ln 116}{\ln \omega RC} = \frac{\ln 116}{\ln 314 \cdot 0,02} = 2,6.$$

Откуда выбираем $n = 3$. Т.е. во входном каскаде располагаем три звена фильтра, а после ДУ еще три звена. Пример схемы расположения каскадов фильтра для термопары представлен на рисунке 4.7.

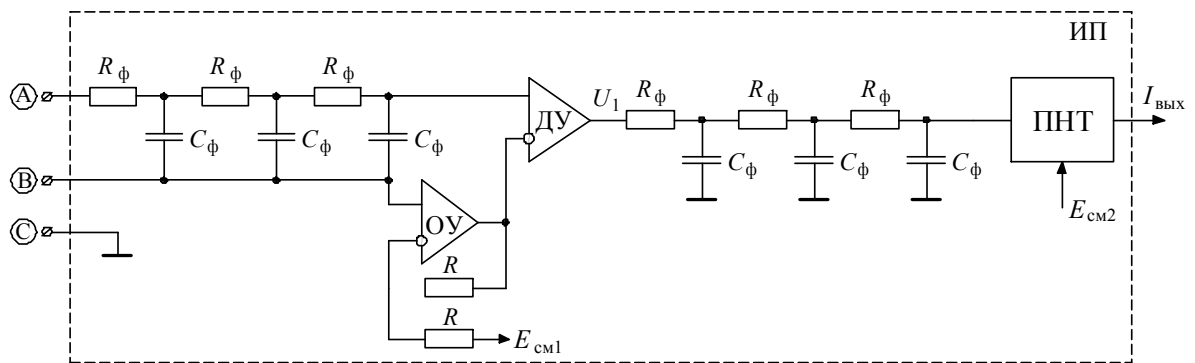


Рисунок 4.7 – Способ установки шестизвенного пассивного фильтра НЧ

Список используемой литературы

1. Карпов, В. А. Электромагнитные расходомеры : учеб. пособие по курсу «Методы и техника научного эксперимента» / В. А. Карпов. – Гомель : ГПИ, 1998. – 70 с.
2. ГОСТ 28723-90 Расходомеры скоростные, электромагнитные и вихревые. Общие технические требования и методы испытаний
3. ГОСТ 15528-86. Средства измерения расхода. Термины и определения
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счётчики количества вещества. / П.П. Кремлевский. – СПб: Политехника, 2004. – 412с.
5. Левин В.М. Расходомеры малых расходов для схем промышленной автоматики. / В.М. Левин. – М: Рипол Классик, 2010. – 81с.
6. Шарапов В.М. Датчики: Справочное пособие /Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М:Техносфера, 2012. –624 с.
7. Вельт И.Д., Михайлова Ю.В. Иммитационный метод градуировки, поверки и исследования электромагнитных расходомеров с помощью ЭВМ. //Приборы и системы управления.-1991.- N12.-С.13-14
8. Карпов В.А., Никеенков А.И. и др. Измеритель относительной скорости судна. А.С. СССР, N 1492925, опубл. 18.03.87.
9. Fiedler O. Moderne Stromungsmesttechnik “Mess.Steuern-Regeln” 2003,26,N3,122-128 (нем.)
10. Измерения в промышленности. Кн.2. Способы измерения и аппаратура. Пер. с нем./ Под ред. П.Профоса - 2-е изд.- М.:Металлургия,1990,210-211
11. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре 2-е изд.-М.:Радио и связь,1981,237-240
12. Fielder O. Stromungs und Durchflusmesttechnik “Mess-Steuern Regeln”,1988,31,N5,194-204 (нем.)
13. Ssalusbury J. Evolution enhanceem magnetic flowmeters. ”Cotr.Instrum”1987,19,N2,43-45 (англ.)
14. Хелд, Г. Технология передачи данных. — 7-е изд. — СПб.: Питер, 2003. — 720 с.
15. Карпов В.А., Ковалев А.В. Измерительный усилитель повышенной чувствительности для термохимического датчика. Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2006 . - №1.-С.57-60
16. Ковалев А.В. Экспериментальное исследование постоянства терморезистивного коэффициента термохимического датчика в расширенном

интервале рабочих температур. Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2004 . - №2.-
С.31-38.