

ний. М.: «Наука», 1986. 288 с.

3. Виноградов А.М., Красильщик И.С., Лычагин В.В. Введение в геометрию нелинейных дифференциальных уравнений. М.: «Наука», 1986. 336 с.

Применение координатных фотоприемников ФДК-124 в лазерных анализаторах загрязнений газов вредными примесями

Ащеульников Е.К., Климова Е.В., Тарасова Л.И.
Университет машиностроения
8(495) 223-05-23 (1587), avt@mami.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы применения лазерных источников света в анализаторах состава смесей выпускных газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания, приведена функциональная схема установки, на которой возможно проводить эксперименты по испытанию и подбору квантовых генераторов для применения в анализаторах загрязнений газов примесями. Установлена возможность применения координатных фотоприемников типа ФДК-124 в анализаторах загрязнения газов микрочастицами.

Ключевые слова: лазерное излучение, квантовый генератор, координатный фотоприемник, фотодиод.

Достижения в квантовой электронике и технике полупроводников позволяют создать устройства, пригодные для проведения диагностики технического состояния автомобиля. Доступность квантовых генераторов (лазеров), их замечательные свойства в сочетании с удобством применения и габаритами дает возможность создавать диагностические устройства, обладающие новыми, отличными от существующих свойствами. Существенное развитие получило направление полупроводниковых лазеров, срок службы которых достигает десятки тысяч часов в непрерывном и импульсном режимах. Низковольтное питание и малые размеры позволяют встраивать их в технологическое оборудование, используемое в диагностике автомобиля, а в сочетании с вычислительной техникой они еще более расширяют технические возможности такого оборудования.

Лазерное излучение в отличие от других излучений оптического диапазона имеет ряд преимуществ: высокую монохроматичность, направленность, огромную плотность в луче, когерентность.

Лучеиспускание лазера E_L во много раз больше лучеиспускания E_0 обычного источника света, что видно из соотношения:

$$\frac{E_L}{E_0} = \frac{10^{35} PQ}{v^2}, \quad (1)$$

где: P - выходная мощность излучения лазера;

Q - добротность объемного оптического резонатора лазера на частоте v ;

v - частота генерации лазера.

Наиболее интересное и перспективное направление в применении лазеров – это использование в исследованиях и практическом применении при определении загрязнений окружающей среды вредными выбросами.

К числу наиболее вредных веществ, загрязняющих среду, относятся окись углерода, окиси азота, двуокись серы, азот и различные аэрозольные частицы. Создание современных точных чувствительных методов измерения концентрации веществ, загрязняющих окружающую среду, особенно актуально в условиях большой плотности автомобильного транспорта. Методы измерения концентрации загрязняющих веществ должны быть быстрыми, точными и не влиять на окружающую среду. Применение обычных методов измерений сопряжено с рядом технических трудностей.

Например, сложно проводить отбор проб выбросов автомобильных двигателей автомо-

билей, движущихся в потоке, или при массовой проверке технического состояния систем питания автомобильных двигателей. Иногда отбор проб приходится производить в условиях сложного доступа к измеряемому объекту и воздействия измерительных средств на измеряемые параметры.

Устройства на основе квантовой электроники и полупроводниковой техники открывают широкие перспективы для осуществления контроля среды дистанционными методами, позволяющими проводить измерения на значительных расстояниях от исследуемого объема без отбора проб и соответствующего химического анализа. Результаты измерений могут быть получены практически мгновенно, особенно при использовании вычислительной техники, без влияния процесса измерения на измеряемые параметры.

Метод зондирования окружающей среды заключается в том, что на исследуемый объем направляется пучок лазерного излучения, и изучаются характеристики прошедшего через этот объем или отраженного от него излучения.

Лазерное излучение взаимодействует с веществом в трех основных процессах: при генерировании лазерного излучения, распространении излучения в среде при прохождении через нее пучка света и при непосредственном воздействии света (излучения) на вещество. Такое разделение условно, так как физика взаимодействия лазерного излучения с веществом практически неразделима в процессах излучения и поглощения.

При воздействии лазерного излучения на вещество проявляются эффекты, связанные с фотохимическими и фотоэлектрическими процессами, теплопроводностью, конвекцией, ионизацией, образованием звуковых и ударных волн.

Характер воздействия лазерного излучения на вещество зависит от режима работы квантового генератора: непрерывный режим, импульсный с модуляцией добротности, генерирования оптического импульса с заданной длительностью.

В нашем случае представляет интерес применения лазерного излучения небольших мощностей.

Оптическое излучение, проникая в среду, поглощается при прохождении через нее в соответствии с законом Бугера – Ламберта [1], [2].

Рассмотрим слой вещества толщиной dx , через который проходит свет.

Количество поглощенной энергии в слое толщиной dx должно быть пропорционально толщине слоя и количеству падающей на слой световой энергии $I(x)$. Обозначим коэффициент пропорциональности между падающей и поглощенной световой энергией через α . Тогда получим выражение для интенсивности света:

$$-dI(x) = \alpha \cdot I(x) dx. \quad (2)$$

Проинтегрируем это выражение при граничном условии

$$I = I_0 \cdot (1 - R_\lambda) \cdot e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где: $R_\lambda = \frac{I_R}{I}$ - коэффициент отражения;

I_R - интенсивность отраженного света;

J - интенсивность падающего света.

Коэффициент отражения $R_\lambda = f(\lambda)$, где λ - длина световой волны.

После интегрирования получим:

$$I(x) = I_0 \cdot (1 - R_\lambda) \cdot e^{-\alpha x}, \quad (4)$$

где: α - коэффициент поглощения.

Величина, обратная α , численно равна толщине слоя, при прохождении через который интенсивность уменьшается в e раз.

Измерение поглощения осуществляется таким образом, чтобы вначале частота генерации лазера совпадала с частотой линии поглощения, а затем отличалась.

Методы, основанные на поглощении, обеспечивают высокую чувствительность в обнаружении газов, их плотности и температуры, так как спектральная поглощательная способ-

ность нечёрного тела зависит от λ и T ($\alpha(\lambda, T)$), что позволяет производить измерения параметров газа.

Наиболее удобным способом является измерение интенсивности J_1 света, прошедшего через газ с толщиной x_1 , и интенсивности J_2 света, прошедшего через эквивалент толщиной x_2 .

Вычисляя коэффициент поглощения из соотношения

$$\frac{J_1}{J_2} = e^{-\alpha(x_2-x_1)}, \quad (5)$$

найдем истинное значение, свободное от поправок на отражение.

Для этой цели наиболее перспективным является применение в качестве приемного устройства координатного фотоприемника.

В случае измерения интенсивности света, прошедшего через газ и эквивалент, лазерный луч расщепляется на два, один из лучей проходит через камеру, в которой находится исследуемый газ, а другой луч проходит через эквивалент. Так как оба луча попадают на мишень фотоприемника в разные секторы, то по разности токов можно определить коэффициент поглощения для данного состояния газа.

На рисунке 1 показана общая схема установки для определения параметров газа и хода лучей. В качестве источника света использован газовый лазер ЛГН-207Б атомарный, одно-модовый непрерывного режима работы, использующийся в фотоэлектрических системах прецизионного оптико-механического оборудования.

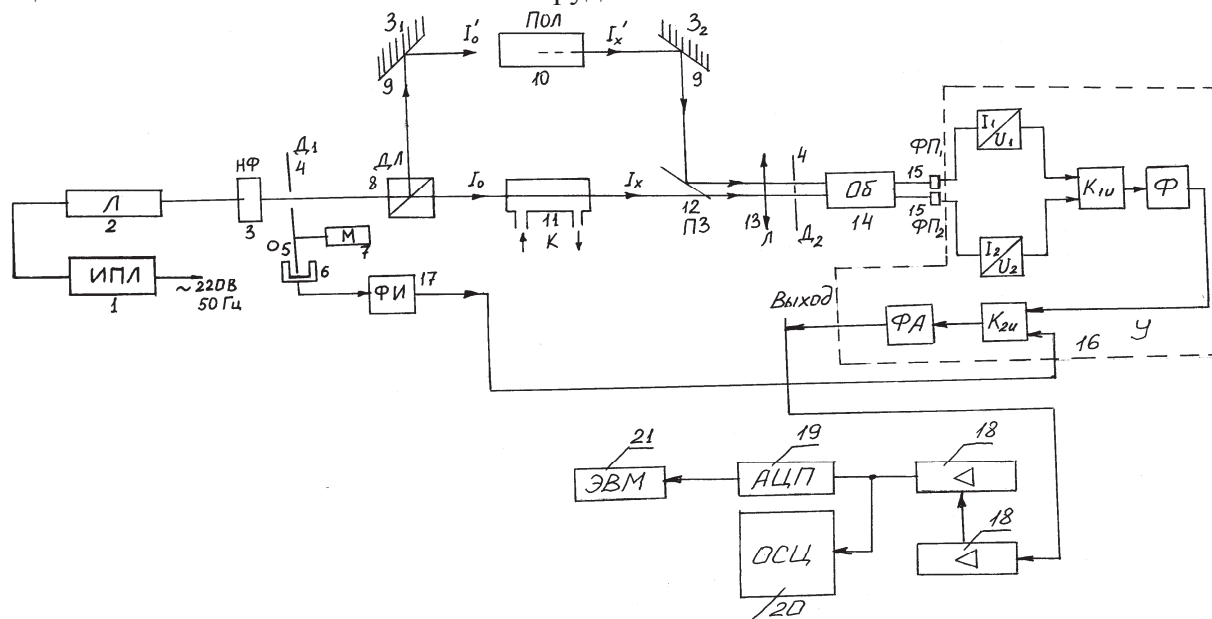


Рисунок 1. Функциональная схема установки: 1 – ИПЛ – источник питания лазера; 2 – Л – лазер; 3 – Ф – нейтральный фильтр; 4 – D_1 и D_2 – диафрагма; 5 – О – обтюратор; 6 – ФД – фотодатчик; 7 – М – мотор обтюратора; 8 – ДЛ – делитель луча; 9 – Z_1 и Z_2 – зеркала; 10 – ПОЛ – поляризатор; 11 – К – кювета; 12 – ПЗ – полупрозрачное зеркало; 13 – Л – линза; 14 – ОБ – объектив; 15 – ФП₁ и ФП₂ – фотоприемники; 16 – У – усилитель; 17 – ФИ – формирователь импульсов; 18 – дифференциальный усилитель; 19 – аналого-цифровой преобразователь; 20 – осциллограф; 21 – ЭВМ

Основные параметры лазера:

- мощность лазерного излучения $b_m = 1 \cdot 10^{-3}$;
- диаметр пучка лазерного излучения, мкм - 0,5-0,7
 - на расстоянии 500 мм – 1,4
 - на расстоянии 40 мм – 0,5;

- расходимость лазерного излучения, мрад – 1,85;
- длина, волны лазерного излучения, мкм: мин. – 0,63; норма – 0,6328; макс. – 0,64;
- относительная нестабильность мощности лазерного излучения за 8 ч. работы, % - 5;
- относительная мощность побочных пучков лазерного излучения, % - 0,2;
- максимальное угловое изменение положения оси диаграммы направленности лазерного излучения за 1 ч работы, рад - $25 \cdot 10^{-6}$;
- напряжение питающей сети не менее 196 В, не более 242 В;
- относительное среднеквадратичное значение пульсаций и шумов мощности лазерного излучения в диапазоне 20 Гц - 200 кГц, % - 0,5.

Для преобразования световой энергии в электрический сигнал используются фотоприемники. По принципу работы фотоприемники, применяемые в анализаторах состава выходящих газов автомобилей, можно разделить на три группы: тепловые, квантовые (фотонные) и фотоприемники с внешним фотоэффектом.

Наиболее приемлемы квантовые или фотонные приемники излучения, у которых под действием падающего фотопотока возникает внутренний фотоэффект. Это селективные приемники с чувствительностью, изменяющейся от длины волны с малой постоянной времени от нескольких микросекунд до наносекунд, но для своей работы требующие иногда глубокого охлаждения. К этой группе приемников относят фотосопротивления, фотодиоды, фототранзисторы и фокальные решетки.

В качестве фотоприемника в экспериментальной установке использован фотоприемник типа ФДК-124 с темновым током $I_T = 165$ мкА для одного квадранта. Общая чувствительность для всех четырех квадрантов $S_{\text{умм}} = 055$ А/Вт, для одного - 0,13 А/Вт (рисунок 2).

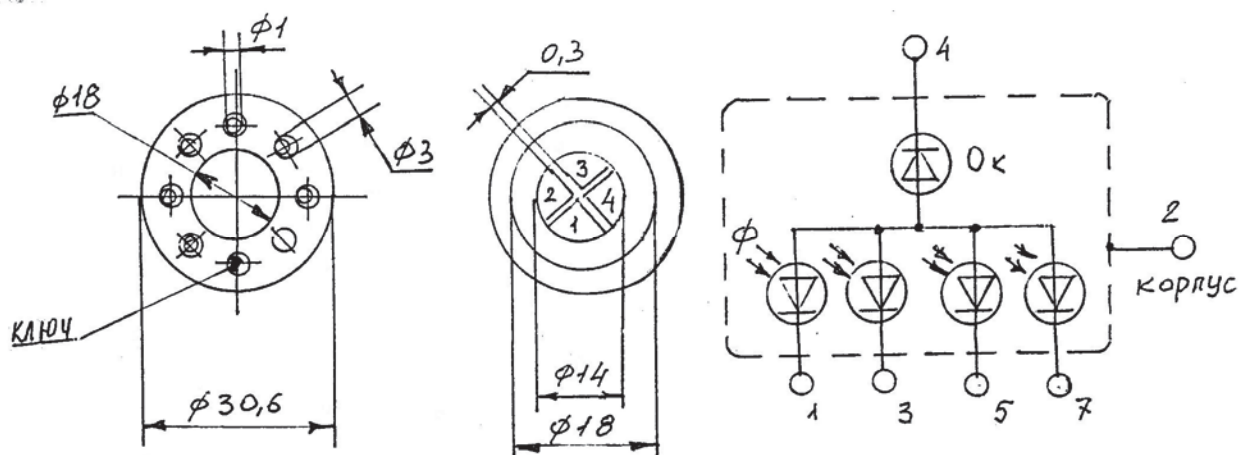


Рисунок 2. Фотоприемник ФДК-124

Основными параметрами фотоприемника являются: квадратный размер фоточувствительного элемента 13,7 мм; $\Delta\lambda = 0,3 - 1,1$ мкм; $\Delta\lambda = 0,72 - 0,85$ мкм; $U_p = 120$ В; $I_T = 1,5$ мкА; $\Phi_{\text{ин}}$ не более $8 \cdot 10^{-12}$ лм/Гц^{1/2}; τ не более $1,6 \cdot 10^{-7}$, $8 \cdot 10^{-3}$ с; K_{PC} не более 5%; сопротивление изоляции не менее 200 мОм; масса не более 21,0 г; диапазон рабочих температур -60 – +70°C; рабочее давление, мм рт. ст. (Па), $10^{-4} - 2200$ ($1,3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^5$); что и регистрируется индикатором. Нулевые показания индикатора электронной схемы свидетельствуют о точности определения положения центра пучка, а величина отклонения количественно характеризует величину разъюстировки. При этом лазер должен работать в одномодовом режиме.

Принцип работы фотодиода заключается в следующем. При отсутствии освещения ($\Phi = 0$) и внешнего напряжения ($E = 0$) существует равновесие между потоками носителей заряда через р-п переход. При освещении фотодиода ($\Phi > 0$) в его базе под действием квантов света развивается процесс генерации пар зарядов. Наиболее интенсивен процесс генерации пар зарядов у внешней поверхности базы. Вновь образовавшиеся электроны и дырки диффундируют через толщину базы к р-п переходу. Дырки увлекаются контактным полем и выбра-

ссылаются в р-область, увеличивая, таким образом, плотность потока неосновных носителей через переход, а следовательно, и обратный ток в приборе. Для того чтобы вновь образовавшиеся дырки могли в большинстве своем достичь области р-п перехода, толщина базы должна быть меньше диффузной длины дырок: $w < L_p$.

Фотодиоды используются как с внешним источником питания, так и без него. В первом случае при последовательном соединении фотодиода, нагрузочного сопротивления и источника питания фотодиод работает в режиме фотосопротивления. Такой режим работы называется фотодиодным. Во втором случае, т.е. в схеме без внешнего источника питания, фотодиод работает в режиме преобразования энергии излучения в электрическую энергию. Такой режим работы называется вентильным.

Значение фототока в первом приближении можно найти из выражения

$$I_f = S_{\text{инт}} \cdot \Phi, \quad (6)$$

где: $S_{\text{инт}}$ - интегральная чувствительность.

Как следует из принципа работы фотодиода, фототок суммируется с обратным током теплового происхождения. В соответствии с этим уравнение тока р-п перехода фотодиода, известное из теории работы полупроводниковых приборов, имеет вид

$$I_{\text{общ}} = I_f - I_s \cdot (e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (7)$$

где: I_s - тепловой ток р-п перехода;

$\varphi_T = \frac{kT}{e}$ - температурный потенциал.

Если фотодиод замкнут на резистор R , то напряжение на р-п переходе $U_{\text{вых}} = IR$. Тогда ток в цепи р-п перехода

$$I_{\text{общ}} = I_f - I_s \cdot (e^{IR/\varphi_T} - 1). \quad (8)$$

Решив (8) относительно $U_{\text{вых}}$, получим:

$$U_{\text{вых}} = \varphi_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_f - I_{\text{общ}}}{I_s}\right). \quad (9)$$

Уравнение (9) аналитически описывает вольт-амперную характеристику фотодиода.

При коротком замыкании фотодиода ($U=0$) ток в цепи диода $I_{\text{общк}}$ равен фототоку:

$$I_{\text{общк}} = I_f = S_{\text{инт}} \cdot \Phi. \quad (10)$$

В режиме холостого хода ток в цепи отсутствует ($I=0$) и напряжение на зажимах фотодиода U_x , согласно (9), растет по логарифмическому закону при увеличении светового потока:

$$U_x = E_f = \varphi_T \cdot \ln(1 + S_{\text{инт}} \Phi / I_s). \quad (11)$$

Материалами для изготовления фотодиодов служат германий, кремний, селен, сернистый таллий и сернистое серебро.

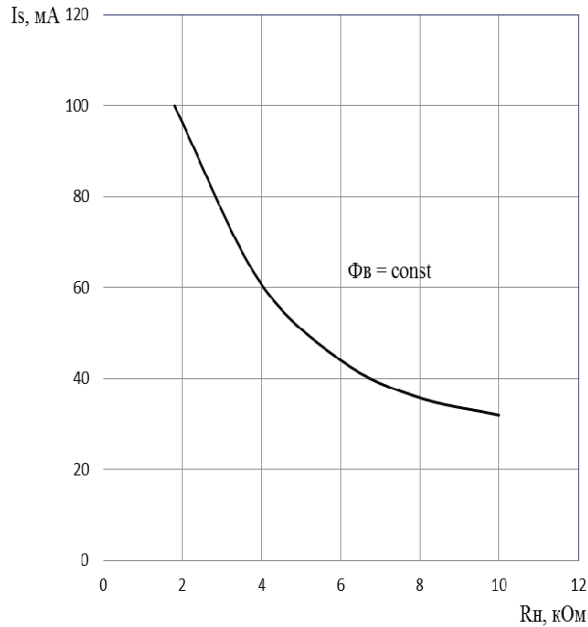
Полученные характеристики позиционного фотодиода представлены на рисунке 3.

Световой сигнал, прошедший через кювету поглощения, как правило, имеет малую интенсивность, фотоприемник должен обладать высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов. Для устранения влияния паразитных засветок на информационную часть светового сигнала, оптическая схема выбирается таким образом, чтобы информация поступала от разности интенсивностей двух световых сигналов. Поэтому для преобразования оптических сигналов в электрические можно использовать два фотоприемника и дифференциальный усилитель, выполненный на операционных усилителях. В качестве базового усилителя применялся операционный усилитель типа К140УД17А. Применение малозумящего операционного усилителя К140УД17А дает существенный выигрыш в отношении сигнал/шум.

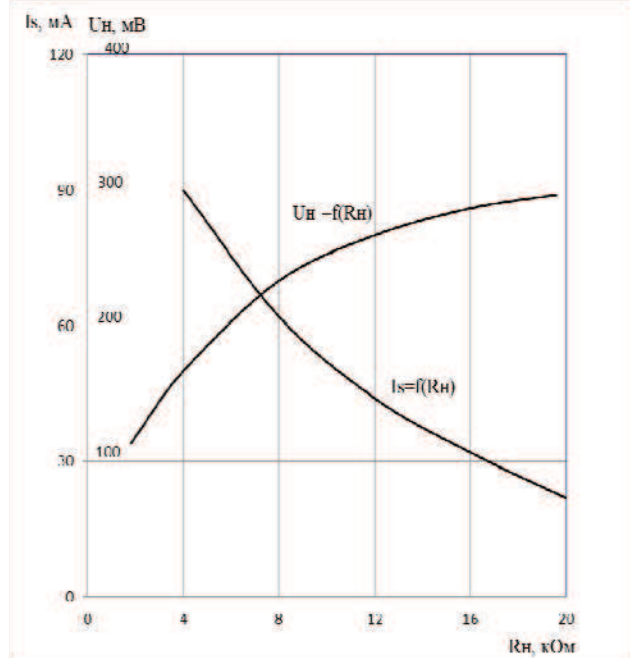
Основные параметры усилителя: выходное напряжение усилителя

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_3}\right) \cdot \frac{R_6}{R_4}; \quad K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; \quad \text{коэффициент усиления } K_{yc} = 1000; \quad \text{линейность } 0,002\%;$$

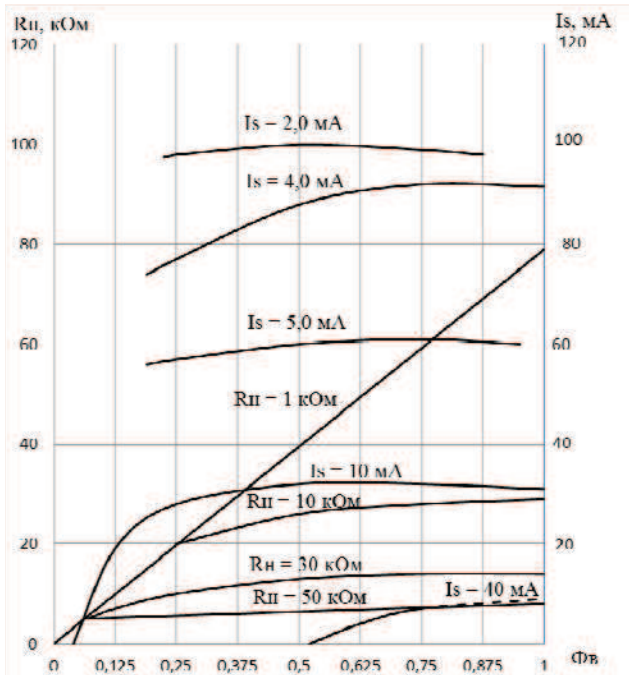
скорость нарастания 2,5 В/мкс; коэффициент отрицательной обратной связи КООС=120дБ; R - подстраивается до получения максимального значения КООС; величина шумов равна 0,5 мкВ (пик); величина входного сопротивления $R_{\text{вх}} = 100 \text{ ГОм}$; входной ток $I_{\text{вх}} = 1,0 \text{ нА}$.



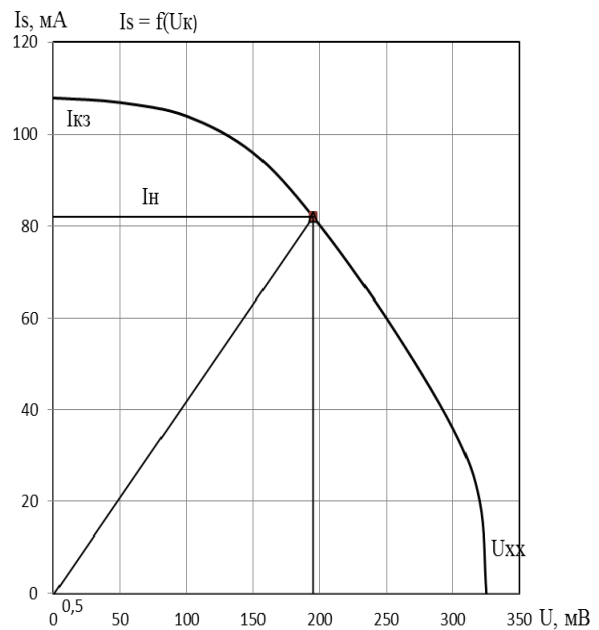
а) Зависимость тока фотодиода I_S от нагрузочного сопротивления R_H при $\Phi = \text{const}$



б) Зависимость тока фотодиода I_S от нагрузочного сопротивления R_H и зависимость напряжения на нагрузке U_H от нагрузочного сопротивления R_H



в) Характеристики фотодиода ФДК-124



г) Вольт-амперная характеристика в режиме генератора

Рисунок 3. Характеристики позиционного фотодиода ФДК-124

Для усиления сигналов от фотоприемников необходим усилитель с симметричным входом и высоким входным сопротивлением. Для построения усилителя с симметричным входом используются три интегральных операционных усилителя. Фотоприемники подключаются к усилителям, преобразующим ток фотодиодов в напряжение. Выходное напряжение с преобразователя «ток-напряжение» поступает на усилители с симметричными входами. Два из них работают как неинвертирующие усилители, частично охваченные обратной связью, третий операционный усилитель (ОУ) суммирует выходные сигналы первых двух. Высокое входное сопротивление достигается введением обратной связи в неинвертирующих ОУ.

Величина коэффициента усиления K_u находится в диапазоне 10 – 2000. Увеличение K_u до 104 приводит к ухудшению стабильности усилителя и увеличивается дрейф постоянного выходного напряжения. Далее сигнал с суммирующего усилителя через фильтр поступает на усилитель с коэффициентом $K_u = 2$, на входы этого усилителя поступают так же сигналы от датчика синхронизации, установленного на обтюраторе. После усиления сигнал через активный фильтр поступает на регистрирующую аппаратуру.

В данной работе был выполнен анализ лазерных источников света и их пригодности для использований в анализаторах состава смесей выпускных газов автомобильных ДВС, проведены исследования расходимости луча газового лазера. Произведены подбор фотоприемных устройств для анализатора выпускных газов, а также анализ работы фотодиода и снятие его характеристик. Представлена экспериментальная лабораторная установка для определения параметров выпускных газов автомобиля.

Литература

1. Реди Дж. Промышленное применение лазеров. – М.: Мир, 1991.
2. Промышленное применение лазеров. Под ред. Г. Кебнера, пер. с англ., М.: Машиностроение, 1988.

Влияние параметров и условий качения эластичных колес на их силовые и кинематические характеристики

Балабина Т.А., Баловнев Н.П., Иванов В.А., Чепурной С.И.

Университет машиностроения

8(495)2230523 – доб. 1390, tmm@mami.ru

Аннотация. В статье из рассмотрения явлений, происходящих в контакте эластичного колеса с жестким основанием, рассматриваются вопросы кинематики и механики качения эластичных колес, имеющих цилиндрическую и тороидальную форму беговой дорожки, по жесткой поверхности при прямолинейном и криволинейном движении, с уводом и без него, по жестким барабанам; выявлены неизвестные ранее закономерности, особенности влияния параметров и условий качения колес на их силовые и кинематические характеристики.

Ключевые слова: колесо, качение, сопротивление качению, трение, криволинейное движение, увод, барабан.

Анализ работ, посвященных исследованию колесных машин, показывает, что в настоящее время существуют нераскрытые или малоисследованные вопросы, связанные с методами определения нагруженности трансмиссии, оценкой долговечности ее деталей и узлов, влиянием конструктивных параметров машин, динамики изменения силовых и кинематических характеристик шин на тяговые и эксплуатационные показатели в различных условиях эксплуатации.

Характерной особенностью колесных машин является наличие у них эластичных колес, во многом определяющих надежность, экономичность, тягово-эксплуатационные показатели, нагрузочный режим трансмиссии, устойчивость и управляемость, проходимость машин. Это определяет то внимание, которое уделялось и уделяется теории качения, исследованию