

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ В ТОК В ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХОМЕТРАХ И СПИДОМЕТРАХ АВТОМОБИЛЕЙ

В.П. Падеров, Н.А. Акимов, В.В. Никулин
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

В новых моделях отечественных автомобилей применяются, как правило, электронные спидометры и тахометры [1], которые управляются импульсами с датчиков Холла или первичной цепи системы зажигания, частота следования которых пропорциональна скорости движения автомобиля или частоте вращения коленчатого вала двигателя. Электронная схема преобразует импульсные сигналы в ток, пропорциональный частоте следования импульсов. Чем выше частота следования импульсов, тем больше среднее значение тока, протекающего через магнитоэлектрический измерительный прибор, что и фиксируется в виде показаний его стрелки по шкале, отградуированной в скорости движения автомобиля или скорости вращения коленчатого вала двигателя.

Принципиальная схема электронного тахометра, выпускаемого на базе ИМС таймера КР1006ВИ1, приведена на рис.1.

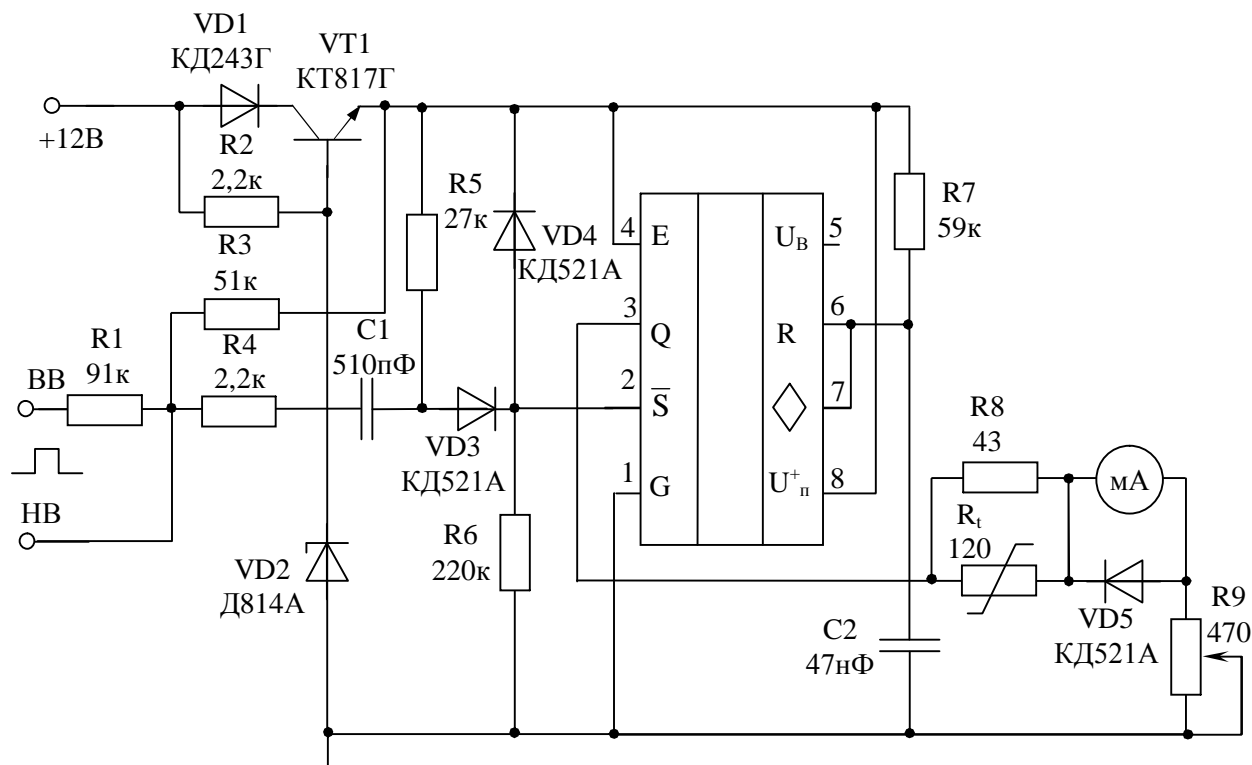


Рис. 1. Принципиальная схема электронного тахометра на базе ИМС
КР1006ВИ1

Принципиальная схема представляется собой одну из разновидностей использования таймера в качестве одновибратора. Элементы R_7 и C_2 являются времязадающими при формировании стабильного по длительности импульса. Элементы R_4 , C_1 , R_5 , $VD3$ и R_6 формируют низкий уровень на входе S (вывод 2 ИМС) на срезах входных импульсов. Транзистор $VT1$, резистор R_2 и стабилитрон $VD2$ выполняют функцию параметрического стабилизатора, формирующего напряжение питания для ИМС. Диод $VD1$ является защитным от переполюсовки напряжения питания. Диод $VD4$ ограничивает максимальное напряжение на входе ИМС. Резистор R_3 является нагрузочным резистором датчика Холла, имеющего выход в виде ключевого транзистора с открытым коллектором.

Поскольку стрелочный миллиамперметр является достаточно инерционным прибором (постоянная времени $\tau > 0,2$ с), миллиамперметр будет показывать усредненный во времени ток

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_0(t)}{R_S + R_A} dt, \quad (1)$$

где T – период следования входных импульсов;
 $V_0(t)$ – мгновенное значение напряжения на выходе (вывод 3 ИМС);

$$R_S = \frac{R_t \cdot R_8}{R_t + R_8} + R_9 \quad (2)$$

– сопротивление резисторов, включенных последовательно миллиамперметру;

R_A – сопротивление внутренней катушки миллиамперметра;

R_t – термосопротивление, обеспечивающее температурную стабильность показаний.

Выходное напряжение обычно представляет собой прямоугольные импульсы, если длительности фронтов много меньше длительности импульса. При частоте входных сигналов меньше 1 кГц это условие выполняется с высокой точностью. Тогда выражение (1) легко интегрируется и

$$I_{cp} = \frac{V_{0max}}{R_S + R_A} \Delta t \cdot f, \quad (3)$$

где $\Delta t = R_7 \cdot C_2 \ln 3$ (4)

- длительность импульса, вырабатываемого одновибратором;

$f = 1/T$ (5)

- частота входных импульсов;

$V_{0max} \approx V_{st} - 2V_{BE}$, (6)

- максимальное напряжение на выходе ИМС;

$V_{st} = V_Z - V_{BE}$ (7)

- напряжение на выходе параметрического стабилизатора;

V_Z - напряжение стабилизации стабилитрона VD2;

V_{BE} - напряжение на эмиттерном переходе транзистора, работающего в активном режиме или режиме насыщения.

С учетом выражений (2), (4) – (7) величина среднего тока миллиамперметра будет определяться соотношением:

$$I_{cp} \approx \frac{V_Z - 3V_{BE}}{\frac{R_t \cdot R_8}{R_t + R_8} + R_9 + R_A} 1,1 \cdot R_7 \cdot C_2 \cdot f. \quad (8)$$

Температурный коэффициент этого тока с учетом того, что температурные коэффициенты элементов R_8, R_9, R_A, R_7, C_2 малы, будет определяться соотношениями

$$\frac{1}{I_{cp}} \cdot \frac{dI_{cp}}{dT} = \frac{\frac{dV_Z}{dT} - 3 \frac{dV_{BE}}{dT}}{V_Z - 3V_{BE}} - \frac{1}{R_s} \cdot \frac{dR_s}{dT}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{R_s} \cdot \frac{dR_s}{dT} = \frac{\frac{1}{R_t} \cdot \frac{dR_t}{dT}}{\left[1 + (R_9 + R_A) \frac{R_8 + R_t}{R_8 \cdot R_t} \right] \left(1 + \frac{R_t}{R_8} \right)}, \quad (10)$$

где $\frac{dV_Z}{dT} \approx 3 \text{ мВ}^{\circ}\text{С}$ - температурный коэффициент напряжения стабилизации стабилитрона,

$\frac{dV_{BE}}{dT} \approx -2 \text{ мВ}^{\circ}\text{С}$ - температурный коэффициент напряжения на эмиттерном переходе транзистора,

$\frac{1}{R_t} \cdot \frac{dR_t}{dT}$ - относительный температурный коэффициент термосопротивления.

Угол отклонения стрелки миллиамперметра магнитоэлектрического типа пропорционален величине среднего тока и магнитной индукции постоянного магнита $B/2$:

$$\varphi = K \cdot I_{cp} B, \quad (11)$$

где K - коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции стрелочного прибора.

С ростом температуры магнитная индукция постоянных магнитов, как правило, уменьшается. Следовательно, чтобы угол отклонения стрелки не зависел от температуры, необходимо, чтобы

$$\frac{d\varphi}{dT} = 0, \quad (12)$$

откуда следует, что температурный коэффициент среднего тока должен быть положителен и отвечать условию:

$$\frac{1}{I_{cp}} \cdot \frac{dI_{cp}}{dT} = -\frac{1}{B} \frac{dB}{dT}. \quad (13)$$

Подставив (9) и (10) в (13), получаем условие на отношение номиналов резисторов, при которых можно достичь температурной компенсации показаний стрелочного прибора:

$$\left[1 + \frac{(R_9 + R_A) \cdot (R_8 + R_7)}{R_8 \cdot R_t} \right] \cdot \left(1 + \frac{R_t}{R_8} \right) = \frac{(-1/R_t \cdot dR_t/dT)}{\left(-\frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dT} \right) - \frac{dV_Z/dT - 3V_{BE}/dT}{V_Z - 3V_{BE}}}. \quad (14)$$

Из анализа выражения (14) следует, что при калибровке схемы, то есть изменении резистора R_9 , будет изменяться и условие температурной компенсации. Поэтому в данной схеме практически невозможно добиться одновременно точной калибровки и температурной компенсации показаний стрелочного прибора. Это является существенным недостатком электронной схемы тахометра на основе ИМС КР1006ВИ1.

На рис. 2 приведена принципиальная схема электронного спидометра на основе ИМС КР1086ХА1.

Внутренняя структура ИМС включает в себя шесть функциональных блоков. Входной сигнал поступает с открытого коллектора датчика Холла, находящегося в коробке передач, через фильтр нижних частот R_1, R_2, C_1 . Импульсы длительностью менее 0,2 мс не будут влиять на работу ИМС. Триггер Шмитта не реагирует на высокочастотные помехи и наводки амплитудой менее 1 В. Нижний и верхний пороги срабатывания триггера Шмитта составляют 2,5 и 3,5 В, соответственно. С выхода триггера Шмитта импульсы поступают на вход блока сопряжения с маршрутным компьютером и вход одновибратора. Одновибратор вырабатывает импульсы заданной длительности, засинхронизированные по срезу входных импульсов. Длительность импульсов, вырабатываемых одновибратором, определяется внешней RC – цепью в соответствии с уравнением

$$t_p = R_{2,11} C_2 \cdot \ln(2 - \Delta) \approx 0,67 \cdot R_{2,11} C_2, \quad (15)$$

где $R_{2,11} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + R_5$ - сопротивление резисторов подключенных между выводами 2 и 11 ИМС;

$\Delta \approx 0,045$ - поправка, зависящая от напряжения насыщения интегральных транзисторов и разности напряжений на эмиттерном переходе транзистора, при которых транзистор открывается и входит в режим насыщения.

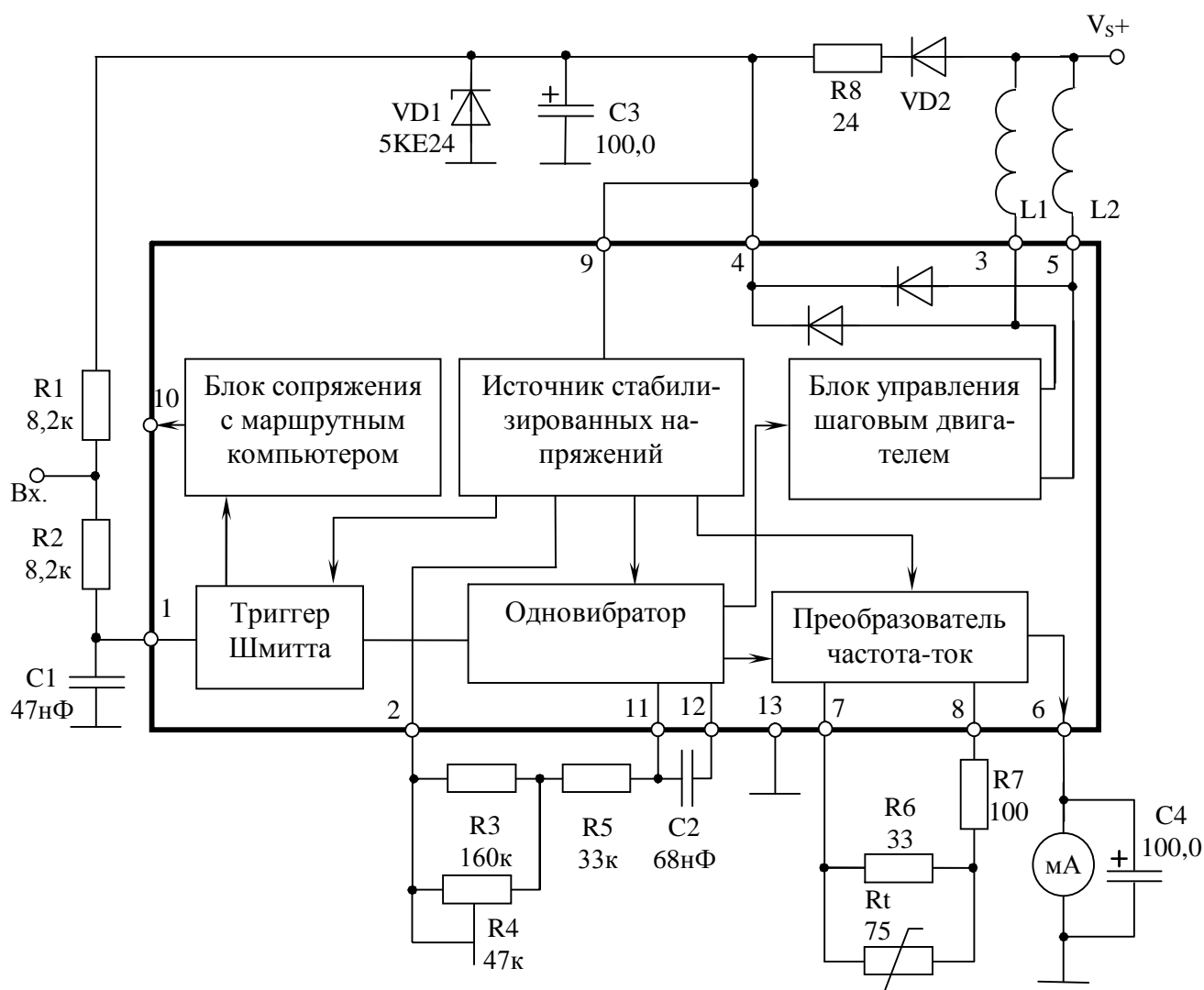


Рис.2. Принципиальная схема электронного спидометра на основе ИМС КР1086ХА1

В течение квазистабильного состояния t_p одновибратор не реагирует на изменение состояния на входе, поэтому возможные помехи не могут производить ложных импульсов.

Импульсы с одновибратора поступают на вход блока управления шаговым двигателем индикатора пробега и на вход преобразователя частота – ток. Функциональная схема преобразователя частота – ток приведена на рис. 3.

Функциональная схема состоит из блока задания термостабильного напряжения (стабилитрон VD_1 , транзисторы VT_1 , VT_2 , резисторы R_1 , R_2 и источник тока I_Q), операционного усилителя (ОУ) и составных выходных транзисторов VT_3 , VT_4 , охваченных стопроцентной отрицательной обратной связью, так что ОУ работает в режиме преобразователя входного напряжения в выходной

ток, если ключ К разомкнут. Ключ К находится в разомкнутом состоянии на время действия импульса с одновибратора t_p . После этого ключ К замыкается, и

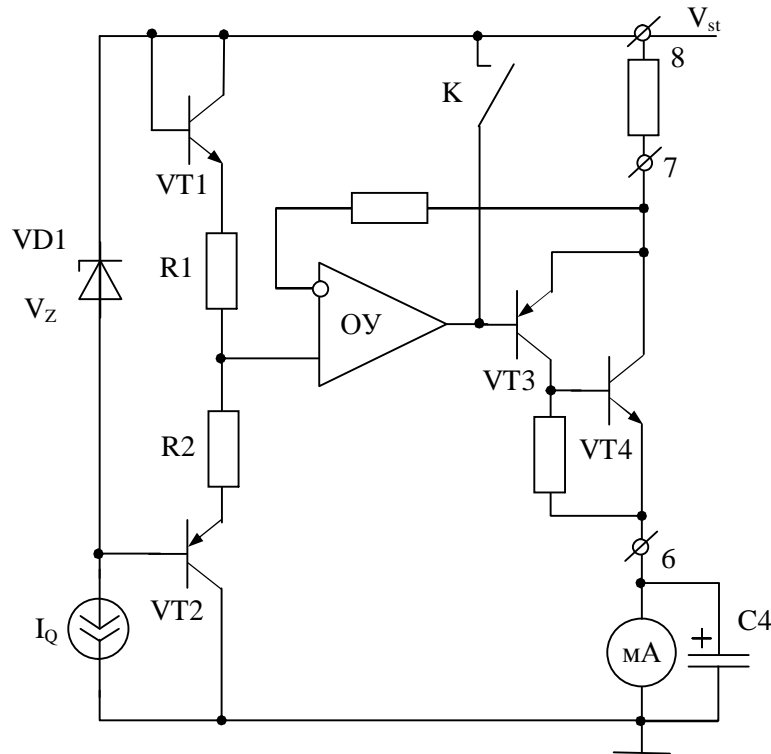


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя частота- ток

выходной ток через миллиамперметр становится равным нулю. В активном режиме работы ОУ (ключ К разомкнут) через миллиамперметр потечет такой ток, при котором дифференциальное напряжение на входе УО станет близким к нулю, т.е.

$$\Delta V_{8,7} = V_{BE1} + \Delta V_{R1}, \quad (16)$$

где $\Delta V_{8,7}$ - напряжение между выводами 8 и 7 ИМС,
 V_{BE1} - напряжение на эмиттерном переходе транзистора VT₁,

$$\Delta V_{R1} = \frac{V_Z - V_{BE1} - V_{BE2}}{1 + R_2/R_1} \quad (17)$$

- падение напряжения на резисторе R₁,
 V_Z - напряжение пробоя стабилитрона VD₁.

Величина мгновенного тока через миллиамперметр

$$i(t) = \frac{\Delta V_{8,7}}{R_{8,7}}, \quad (18)$$

где $R_{8,7} = \frac{R_6 \cdot R_t}{R_6 + R_t} + R_7, \quad (19)$

R_t - термосопротивление, обеспечивающее температурную стабильность показаний.

С учетом (16) и (17) напряжение $\Delta V_{8,7}$ в течении времени t_p

$$\Delta V_{8,7} = V_{BE1} + \frac{V_Z - V_{BE1} - V_{BE2}}{1 + R_2/R_1}. \quad (20)$$

Среднее значение тока через миллиамперметр определяется по выражению аналогичному (1), и с учетом (15)

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dT = \frac{\Delta V_{8,7}}{R_{8,7}} \cdot 0,67 \cdot R_{2,11} \cdot C_2 \cdot f. \quad (21)$$

Таким образом, среднее значение тока, как и для схемы тахометра (выражение (8)), пропорционально частоте входных импульсов. Однако в этой схеме, цепи калибровки (резистор $R_{2,11}$) и температурной компенсации показаний (резистор $R_{8,7}$) разделены и не влияют друг на друга. Кроме того, падение напряжения $\Delta V_{8,7}$ является температурно-независимым параметром, поскольку отношение резисторов удовлетворяет условию

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{dV_Z/dT}{(-dV_{BE}/dT)} + \frac{dV_{BE2}/dT}{dV_{BE1}/dT} \approx 2,5, \quad (22)$$

при котором $d(\Delta V_{8,7})/dT = 0$. С помощью этой схемы можно добиться меньшей погрешности показаний и лучшей температурной стабильности.

Основным недостатком обеих схем является зависимость погрешности показаний от степени отклонения импульсов с одновибратора от прямоугольной формы, то. есть от длительности и формы фронтов по отношению к длительности самого импульса. Этот недостаток устранен в схеме электронного тахометра, разработанного сотрудниками ЗАО «НИИ Инмикротех». Его принципиальная схема и функциональная схема ИМС приведена на рис. 4.

Функциональная схема ИМС включает в себя 8 блоков: стабилизатор напряжения, ограничитель напряжения питания, преобразователь напряжение – ток на двух ОУ, компаратор, ограничитель входного сигнала, триггер Шмитта, цифровой блок, выходной каскад.

Стабилизатор напряжения вырабатывает термнезависимое напряжение около 6 В для питания некоторых блоков ИМС и формирования опорного напряжения V_{ref} для компаратора. Ограничитель напряжения питания предназначен для защиты ИМС от импульсов перенапряжения бортовой сети.

Преобразователь напряжение – ток осуществляет зарядку внешней емкости C_1 током, пропорциональным току через миллиамперметр. Компаратор сравнивает напряжение на емкости C_1 и опорное напряжение V_{ref} . Ограничитель входного сигнала спроектирован таким образом, что тахометр может работать от любого источника сигнала (датчик Холла, фаза генератора, первичная

обмотка катушки зажигания). Триггер Шмитта «фильтрует» высокочастотные помехи и имеет низкий и высокий уровни переключения 2,5 и 3,5 В, соответ-

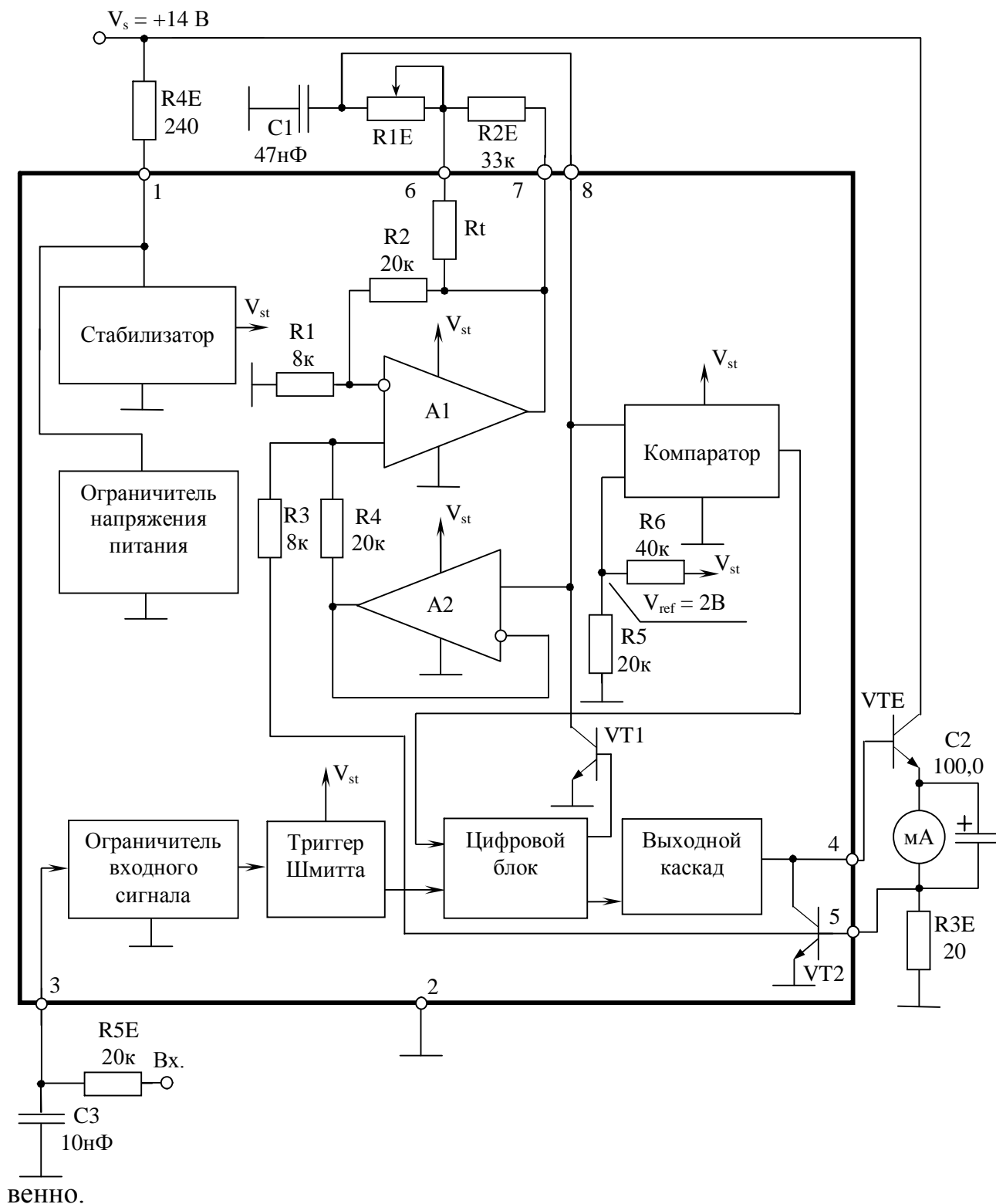


Рис.4. Принципиальная схема тахометра и функциональная схема ИМС

Цифровой блок представляет, по существу, RS - триггер, управляющий работой выходного каскада, а транзистор VT₁ работает как ключ, разряжая ем-

кость C_1 . Выходной каскад управляет работой внешнего ключевого транзистора VTE , а транзистор VT_2 ограничивает максимальную величину тока через миллиамперметр.

Схема работает следующим образом. Сигнал с тахометрического датчика устанавливает RS - триггер в такое состояние, при котором выходной каскад открывает транзистор VTE . При этом через миллиамперметр течет ток и начинается заряд емкости C_1 . При заряде емкости C_1 до уровня опорного напряжения V_{ref} RS -триггер сбрасывается сигналом с компаратора, выходной транзистор VTE закрывается, емкость C_1 быстро разряжается через транзистор VT_1 , а компаратор возвращается в исходное состояние, снимая сигнал сброса с триггера. Однако триггер хранит последнее состояние до прихода следующего входного импульса с тахометрического датчика.

Форма импульсов тока, протекающих через миллиамперметр близка к трапециевидной, поскольку максимальная амплитуда тока ограничивается транзистором VT_2 . Выражение для среднего тока будет иметь вид

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{f}{R_{3E}} \int_0^{\Delta t} V_{R3}(t) dt, \quad (23)$$

где

$$I(t) = \frac{V_{R3}}{R_{3E}} \approx \frac{V_{BE2}}{R_{3E}} \quad (24)$$

- мгновенное значение тока,

Δt - длительность протекания тока через транзистор VTE .

Длительность протекания тока Δt определяется временем заряда конденсатора C_1 до величины опорного напряжения

$$V_{ref} = \frac{V_{st}}{1 + R_6/R_5}. \quad (25)$$

Емкость C_1 заряжается от преобразователя напряжение – ток, и напряжение на конденсаторе изменяется во времени по закону

$$V_{C1}(t) = \frac{1}{C_1} \int_0^t I_t dt, \quad (26)$$

где

$$I_t = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{R3E}}{R_{7,8}} \quad (27)$$

- ток заряда емкости /3/;

$R_{8,7}$ - сопротивление резисторов, включенных между выходом преобразователя напряжение - ток и конденсатором C_1 (между выводами 8 и 7 ИМС).

При подстановке (27) в (26) получим

$$V_{C1}(t) = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_{7,8} \cdot C_1} \int_0^t V_{R3E} dt. \quad (28)$$

За время Δt напряжение на конденсаторе C_1 достигнет величины опорного напряжения V_{ref} , выходной транзистор VTE закроется, а транзистор VT₁ зарядит емкость C_1 практически до нуля, т.е.

$$\frac{R_2}{R_1 \cdot R_{7,8} \cdot C_1} \int_0^{\Delta t} V_{R3E} dt = V_{ref}, \quad (29)$$

откуда

$$\int_0^{\Delta t} V_{R3E} dt = \frac{R_1}{R_2} \cdot C_1 \cdot R_{7,8} \cdot V_{ref}. \quad (30)$$

Подставив (25) в (30), а (30) в (23) получим зависимость среднего тока через миллиамперметр от частоты входных импульсов и параметров схемы

$$I_{cp} = \frac{R_{7,8}}{R_{3E}} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{V_{st}}{1 + R_6/R_5} \cdot C_1 \cdot f. \quad (31)$$

Как следует из (31), средний ток не зависит от формы импульсов тока, а температурная стабильность показаний миллиамперметра определяется стабильностью напряжения стабилизатора ИМС V_{st} и стабильностью параметров внешних элементов $R_{7,8}$, R_{3E} и C_1 . Для компенсации температурной зависимости угла отклонения стрелочного прибора предлагается выбрать R_{3E} и C_1 с термостабильными параметрами, а в резистор $R_{7,8}$ включить интегральный резистор R_t , имеющий положительный температурный коэффициент /4/. Тогда температурный коэффициент среднего тока будет рассчитываться из (31) как

$$\frac{1}{I_{cp}} \cdot \frac{dI_{cp}}{dT} = \frac{1}{R_{7,8}} \cdot \frac{dR_{7,8}}{dT} = \frac{\frac{1}{R_t} \cdot \frac{dR_t}{dT}}{1 + \frac{R_t}{R_{2E}} + \left(1 + \frac{R_t}{R_{2E}}\right)^2 \cdot \frac{R_{1E}}{R_t}}, \quad (32)$$

где $\frac{1}{R_t} \cdot \frac{dR_t}{dT}$ - относительный температурный коэффициент ин-

тегрального резистора,

R_{1E} - построечный резистор, с помощью которого производится калибровка тахометра.

Из (32) следует, что температурный коэффициент среднего тока можно регулировать, меняя соотношение резисторов R_t/R_{2E} . Однако калибровка схемы тахометра с помощью построечного резистора R_{1E} будет незначительно влиять на температурную компенсацию показаний стрелочного прибора.

Таким образом, наилучшую температурную стабильность и наименьшую погрешность преобразования частоты в ток имеет электронный тахометр, разработанный на базе новой ИМС ЗАО «Инмикротех», что подтверждается также экспериментальными измерениями.

Список использованной литературы

1. **Чижов, Ю.П.** Электрооборудование автомобилей. Учебник для ВУЗов / Ю.П. Чижов, С.В. Акимов – М.: «За рулем», 1999. – 384 с.
2. **Шкурин, Г.П.** Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам. Т.1 – Электроизмерительные приборы. - М.: Воениздат., 1960. – 659 с.
3. **Гутников В.С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 304 с.
4. **Соклоф С.** Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 583 с.

Сведения

об авторах статьи «Анализ температурной стабильности и погрешностей преобразования частоты в ток в электронных тахометрах и спидометрах автомобилей»

1. Падеров Виктор Петрович – к.ф.-м.н., зав. кафедрой микроэлектроники ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева», т.8(8342)290625, email – paderov@mail.ru
2. Акимов Николай Александрович – к.т.н., доцент кафедры ПЭ ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева», т.8(8342)478093, email – n.akimov@mail.ru
3. Никулин Владимир Валерьевич – к.т.н., зав. кафедрой СССК ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева», т.8(8342)290786, email – nikulinvv@mail.ru