



УДК 53.08

## РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA328

**В.П. Матющенко**, *vasiliymatwork@yandex.ru*, **М.П. Жданько**, *mixa568@mail.ru*,  
**Д.А. Крюков**, *dimon.k639@gmail.com*.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

В данной статье рассматривается разработка схемы измерения переменного напряжения, применяемой в стенде регулировки стабилизаторов напряжения ТЕРЛОСОН СТ-222, СТ-555, СТ-888, а также моделирование работы этой схемы. Схема измерения разрабатывалась с учетом использования микроконтроллера ATmega328, в качестве приемника и обработчика сигналов. В статье производится расчет элементной базы измерительной схемы. На основе расчета, произведен выбор элементов. Моделирование работы схемы производилось в среде схемотехнического моделирования MicroCap 11. На основе полученной модели, произведен расчет погрешностей измерительной схемы.

**Ключевые слова:** измерения, измерения переменного напряжения, микроконтроллер, ATmega, ATmega328.

## DEVELOPMENT AND MODELING OF VOLTAGE MEASUREMENT SCHEME FOR THE ATMEGA328 MICROCONTROLLER

**V.P. Matyushchenko, M.P. Zhdanko, D.A. Kryukov, .**

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

This article discusses the development of a scheme for measuring AC voltage used in the bench for adjusting voltage regulators TERLOSON ST-222, ST-555, ST-888, as well as modeling the operation of this circuit. The measurement scheme was developed taking into account the use of the ATmega328 microcontroller, as a receiver and signal handler. The article calculates the element base of the measuring circuit. Based on the calculation made by the selection of elements. The simulation of the operation of the circuit was carried out in the MicroCap 11 circuit design simulation environment. Based on the obtained model, the measurement errors of the measurement circuit were calculated.

**Keywords:** measurements, AC voltage measurement, microcontroller, ATmega, ATmega328.

Необходимо измерить переменное напряжение в диапазоне от 0 до 270 В, при этом, общая погрешность измерительной части не должна превышать 2,5%, и быстродействие схемы не должно превышать  $t = 1,3$  с.

Схема измерения напряжения является одними из самых важных функциональных блоков стенда. Чтобы преобразовать измеренное напряжение в сигнал, который может быть обработан микроконтроллером, напряжение необходимо трансформировать в диапазон от 0 до 5 В и выпрямить. Поэтому, составными элементами схемы являются трансформатор, диодный мост, сглаживающий фильтр и делитель напряжения.

Измерительная схема предназначена для измерения напряжения в диапазоне от 0 до 270 В, частотой 50 Гц. Исходя из этого, расчет номиналов элементов, входящих в эти схемы, будет производиться одинаково. Принципиальная схема цепи измерения представлена на рис. 1.

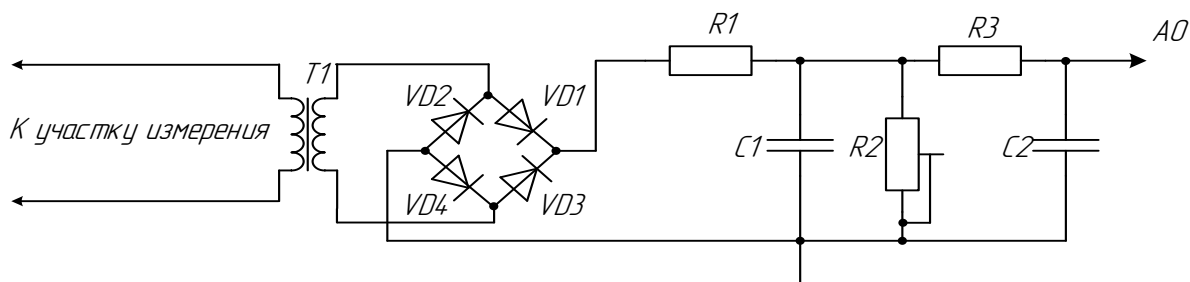


Рис. 1 – Принципиальная схема схемы измерения напряжения.

Трансформатор должен преобразовывать сетевое напряжение 220 В в 12 В. Для расчета трансформатора, необходимо сделать предварительный выбор диодов  $VD1 - VD4$ , входящих в состав моста. Выбираем диоды типа КД522А, со следующими характеристиками [1]:

- Максимальное постоянное обратное напряжение: 30 В;
- Максимальный прямой ток: 100 мА;
- Постоянное прямое напряжение: не более 1,1 В при  $I_{np} 100$  мА;
- Постоянный обратный ток: не более 2 мкА при  $U_{обр} 30$  В;
- Время обратного восстановления: 0,004 мкс;
- Общая емкость: 4 пФ

Необходимо рассчитать максимальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора, при максимально возможном входном напряжении 270 В. Рассчитаем коэффициент трансформации [2]:

$$K = \frac{U_{T2}}{U_{T1}},$$

где  $U_{T1}$  – напряжение первичной обмотки,  $U_{T2}$  – напряжение вторичной обмотки.

$$K = \frac{12}{220} = 0,054.$$

Тогда, максимальное напряжение на вторичной обмотке будет равно [12]:

$$U_{Tmax} = U_T \cdot K = 270 \cdot 0,054 = 14,737 \text{ В.}$$

Для дальнейшего расчета характеристик трансформатора, нужно произвести расчет максимального выпрямленного напряжения на выходе диодного моста  $U_{Bmax}$  и ток нагрузки  $I_n$  [2]:

$$U_{Bmax} = U_{Tmax} \cdot \sqrt{2} - U_D,$$

где  $U_D$  – падение напряжения на диодах КД522А.

$$U_{Bmax} = 14,737 \cdot \sqrt{2} - 1,1 = 19,728 \text{ В.}$$

Нагрузкой являются делитель напряжения и RC фильтр. Проведем расчет делителя напряжения  $R1, R2$  [2]:

$$\frac{U_{вх} \cdot R2}{R2 + R1} = U_{вых},$$

где  $U_{вх} = U_{Bmax}$  – входное напряжение;  $U_{вых} = 5$  В – выходное напряжение, в соответствии с максимальным напряжением для вывода микроконтроллера;  $R1, R2$  – сопротивления резисторов делителя.



Принимаем  $R1 = 20$  кОм. Тогда сопротивление резистора  $R2$ :

$$\frac{19,728 \cdot R2}{R2 + 20000} = 5;$$
$$19,728 \cdot R2 = 5 \cdot R2 + 100000;$$

$$R2 = \frac{100000}{14,728} = 6790 \text{ Ом.}$$

Для  $R2$  выбираем подстроечный резистор – СП5-2ВБ номиналом 10 кОм, мощностью 0,5 Вт [3]. Проведем расчет  $RC$  фильтра, предназначенного для снижения пульсаций и уменьшения высокочастотных помех [2]:

$$f_{cp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C},$$

где  $f_{cp}$  – частота среза,  $R$  – сопротивление резистора,  $C$  – емкость конденсатора.

При частоте сетевого напряжения  $f = 50$  Гц, частота среза после диодного моста будет равна [2]:

$$f_{cp} = f \cdot 2 + 10 = 110 \text{ Гц.}$$

Принимаем сопротивления резистора  $R3 = 1000$  Ом, тогда емкость конденсатора  $C2$  будет равна:

$$C_2 = \frac{\left(\frac{1}{f_{cp}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot R3} = \frac{\left(\frac{1}{110}\right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000} = 1,4 \text{ мкФ.}$$

Для сглаживающего  $RC$  фильтра выбираем конденсатор  $C2$  – К10-17, номиналом 1,5 мкФ [4]. В качестве делителя напряжения выбираем резистор  $R1$  номиналом 20 кОм и подстроечный резистор номиналом 10 кОм.

Таким образом, общее сопротивление нагрузки будет равно:

$$R_n = R_1 + \left( \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \right) = 20000 + \left( \frac{10000 \cdot 1000}{10000 + 1000} \right) = 20909 \text{ Ом.}$$

При максимально выпрямленном входном напряжении  $U_{B \max}$ , сила тока в цепи нагрузки будет равна:

$$I_n = \frac{U_{B \max}}{R_n} = \frac{19,728}{20909} = 0,0009 \text{ А.}$$

Рассчитаем емкость конденсатора  $C1$ , выполняющего роль сглаживающего фильтра. Определим напряжение пульсаций, в соответствии с погрешностью устройства [5]:

$$U_n = \frac{U_{B \max}}{100} \cdot 2,5 = 0,493 \text{ В.}$$

Отсюда, значение выпрямленного напряжения с учетом пульсаций равно [17]:

$$U_{Bn \max} = U_{B \max} = 19,728 \text{ В;}$$

$$U_{Bn \min} = U_{B \max} - U_n = 19,728 - 0,493 = 19,234 \text{ В,}$$

где  $U_{Bn \max}$ ,  $U_{Bn \min}$  – максимальное и минимальное значение выпрямленного напряжения с учетом пульсаций.



Время заряда конденсатора будет равно [5]:

$$t_{зар} = \frac{\arccos\left(\frac{U_{Bn \min}}{U_{Bn \max}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\arccos\left(\frac{19,728}{19,234}\right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,7 \text{ мс.}$$

Время разряда конденсатора [17]:

$$t_{раз} = T - t_{зар},$$

где  $T$  – период заряда  $T = \frac{(\frac{1}{f})}{2} = \frac{(\frac{1}{50})}{2} = 0,01 \text{ с.}$

$$t_{раз} = 0,01 - 0,0006 = 9,3 \text{ мс.}$$

Таким образом, емкость конденсатора  $C1$  будет равна [5]:

$$C_1 = I_n \cdot \left( \frac{t_{раз}}{U_{B \max} - U_{B \min}} \right) = 0,0009 \cdot \left( \frac{0,0094}{19,728 - 19,333} \right) = 18 \text{ мкФ.}$$

Выбираем конденсатор  $C1$  – К50-35, номиналом 22 мкФ [4]. Проведем расчет трансформатора в соответствии с источником [6]. Номинальная мощность трансформатора [6]:

$$P_N = \alpha \cdot I_n \cdot (U_{T \max} + 2 \cdot U_D),$$

где  $\alpha = 1,5$  – коэффициент формы,  $U_D = 1,1 \text{ В}$  – постоянное прямое напряжение диода КД522А.

$$P_N = 1,5 \cdot 0,0009 \cdot (14,737 + 2 \cdot 1,1) = 0,023 \text{ Вт.}$$

Исходя из рассчитанной мощности, выберем характеристики трансформатора [18]:

- Ш-образный сердечник М42;
- Номинальная мощность  $P_N = 4 \text{ Вт}$ ;
- Коэффициент потерь  $f_u = 1,31$ .

Рассчитаем внутреннее сопротивление трансформатора [6]:

$$R_i = \frac{U_{T \max}^2}{P_n} \cdot (f_v - 1) = 11,16 \text{ Ом};$$

Рассчитаем параметры обмоток [6]:

$$\omega 1 = 4716;$$

$$\omega 2 = 28 \cdot U_{T \max} = 413;$$

$$d1 = 0,09 \text{ мм};$$

$$d2 = 0,61 \text{ мм.}$$

где  $\omega 1$  – число витков первичной обмотки,  $\omega 2$  – нормированное число витков вторичной обмотки,  $d1$  – диаметр провода первичной обмотки,  $d2$  – нормированное сечение провода вторичной обмотки.

Произведем расчёт необходимой мощности резисторов [2]:

$$P_r = I_r^2 \cdot R;$$

$$P_r = U_r \cdot I_r,$$

где  $U_r$  – напряжение на участке цепи резистора,  $I_r$  – ток цепи участка резистора,  $R$  – сопротивление резистора.



$$I_{R1} = I_n = 0,0009 \text{ A};$$

$$P_{R1} = I_{R1}^2 \cdot R_1 = 0,0009^2 \cdot 20000 = 0,0162 \text{ Вт.}$$

Для резисторов  $R2$  и  $R3$ :

$$U_{nap} = I_n \cdot \left( \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \right) = 0,0009 \cdot \left( \frac{10000 \cdot 1000}{10000 + 1000} \right) = 0,81 \text{ В,}$$

где  $U_{nap}$  – напряжение на участке  $R2$ ,  $R3$ .

$$I_2 = \frac{U_{nap}}{R_2} = \frac{0,81}{10000} = 0,000081 \text{ A};$$

$$P_{R2} = I_{R2}^2 \cdot R_2 = 0,000081^2 \cdot 10000 = 0,00007 \text{ Вт};$$

$$I_3 = \frac{U_{nap}}{R_3} = \frac{0,81}{1000} = 0,00081 \text{ A};$$

$$P_{R3} = I_{R3}^2 \cdot R_3 = 0,000081^2 \cdot 1000 = 0,0007 \text{ Вт.}$$

Исходя из проведенных расчетов, сделаем выбор компонентов схемы. Резистор  $R1$  – С2-23, номиналом 20 кОм, мощностью 0,125 Вт [3]. Резистор  $R3$  – С2-23, номиналом 1 кОм, мощностью 0,125 Вт [3].

С помощью инструментов программы, изобразим принципиальную схему измерительного узла. При выборе модели диодов, выберем их зарубежный аналог *1N4148*, так как библиотека отечественных компонентов отсутствует в данной версии программы. Установим выбранные и рассчитанные значения резисторов и конденсаторов, а также значение внутреннего сопротивления трансформатора  $R_i$ , добавим в схему источник синусоидального напряжения  $V1$ , устанавливаем переменное напряжение 12 В, частотой 50 Гц.

Проведем анализ длительности переходных процессов, протекающих в схеме при измерении напряжения. Для этого добавляем в схему нормально открытый ключ  $SW1$ , который будет замыкаться в момент времени  $t = 0$  и размыкаться в момент времени  $t = 1$ , коммутируя источник синусоидального напряжения.

Получившаяся схема и временная диаграмма напряжения на выходе измерительной схемы, показана на рис. 2 и 3.

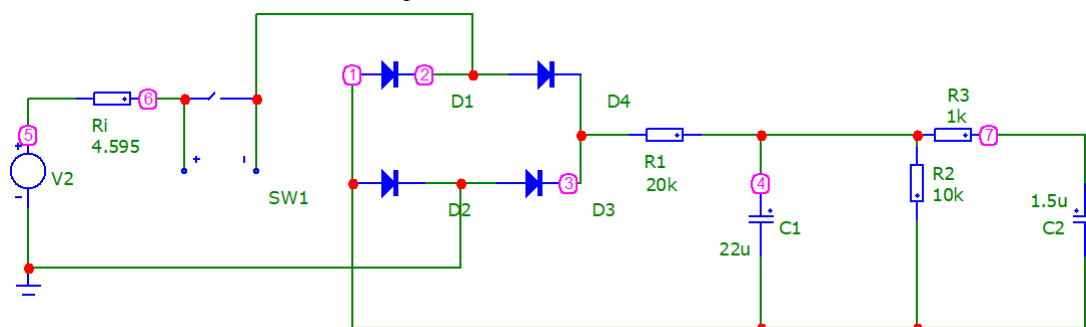


Рис. 2 – Смоделированная схема

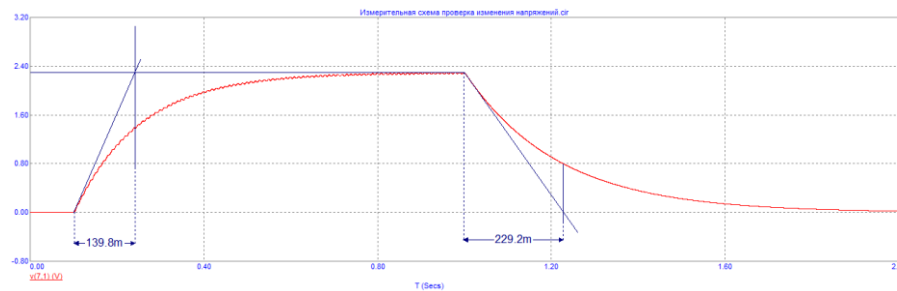


Рис. 3 – Результаты моделирования

Моделирование проведено при временном диапазоне  $t = 2$  секунд. Постоянная времени заряда  $\tau = 0,14$  с, полный заряд происходит за время  $t_{зар} = 3..5 \cdot \tau = 3..5 \cdot 0,14 = 0,42..0,7$  с [2]. Постоянная времени разряда  $\tau = 0,23$  с, полный разряд происходит за время  $t_{разр} = 3..5 \cdot 0,23 = 0,69..1,15$  с.

Проведем анализ времени изменения измеряемого напряжения на выходе измерительной схемы. Добавим в схему еще два источника синусоидального напряжения, V2 на 5 В и V3 на 20 В, которые будут коммутироваться нормально открытыми парами ключей SW3 – SW4 и SW5 – SW6. Ключи SW3 – SW4 замыкаются в момент времени  $t = 1,01$ , размыкаются  $t = 3$ . Ключи SW5 – SW6 замыкаются в момент времени  $t = 3,01$ , размыкаются  $t = 5$ .

Результаты моделирования представлены на рис 3 и 4.

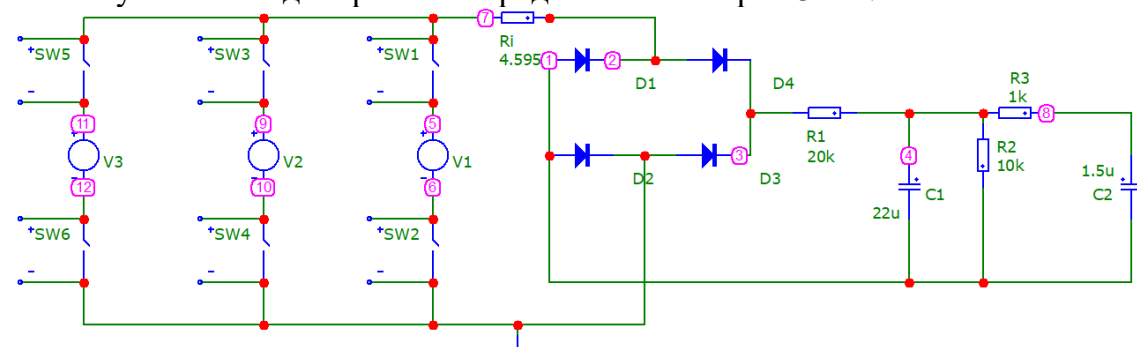


Рис 3 – Смоделированная схема

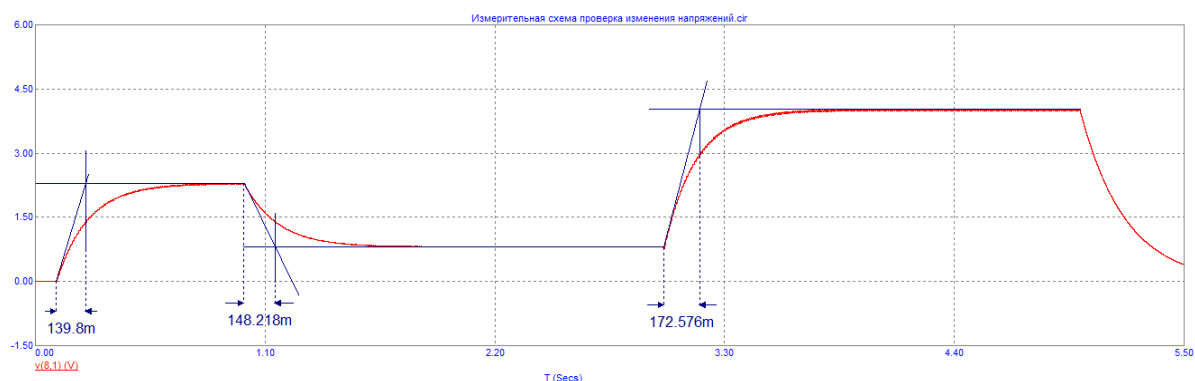


Рис 4 – Результаты моделирования. V1 = 12 В, V2 = 5 В, V3 = 20 В.

Время перехода для участков  $t_{12В-5В}$ ,  $t_{5В-20В}$  равно:

$$t_{12В-5В} = 3..5 \cdot \tau = 3..5 \cdot 0,15 = 0,45..0,75 \text{ с};$$

$$t_{5В-20В} = 3..5 \cdot \tau = 3..5 \cdot 0,17 = 0,51..0,85 \text{ с}.$$

При этом, среднее время переходного процесса будет равно:



$$t_{cp} = \frac{t_{зар} + t_{разр} + t_{12В-5В} + t_{5В-20В}}{4} = 0,51..0,86 \text{ с.}$$

Измерим погрешность, которую вносят пульсации, при максимально возможном значении входного напряжения в 270 В. При выпрямленное напряжение после диодного моста схемы будет составлять  $U_{Bmax} = 19,728 \text{ В}$ . Установим необходимое значение напряжения на источнике питания V1 и измерим пульсации. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

При входном напряжении 270 В, на выходе схемы напряжение будет иметь величину 3,960 В. Тогда, из-за пульсаций, при значении напряжения на выходе измерительной схемы 3,919 В, абсолютная погрешность пульсаций будет равна:

$$\Delta_{изм} = |3,960 - 3,919| = 0,041 \text{ В.}$$

Что соответствует значению измеренного напряжения:

$$U_{изм} = \frac{270 \cdot 0,041}{3,960} = 2,8 \text{ В.}$$

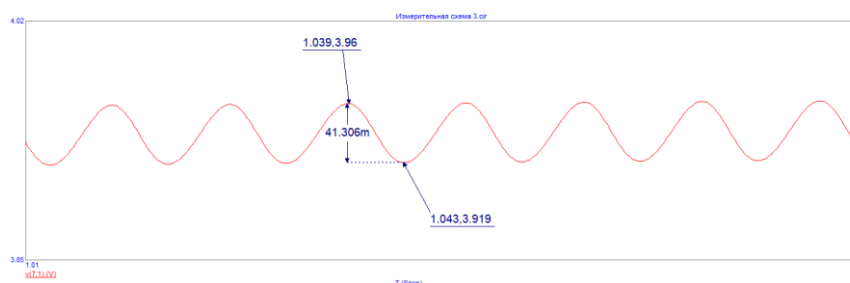


Рис 5 – Измерение погрешности пульсаций

Тогда относительная погрешность составит:

$$\delta_{изм} = \frac{2,8}{270} \cdot 100 = 1,04\% = 1,5 \text{ \%}.$$

Вывод: выполненное моделирование переходных процессов схемы измерения напряжения, показало, что время переходного процесса не превышает  $t = 1,15 \text{ с}$ . С помощью моделирования, была рассчитана относительная погрешность пульсаций, которая составляет 1,5%.

#### Список цитируемой литературы

9. Москатов Е.А. Справочник по полупроводниковым приборам. – Таганрог: Зенит, 2010. – 219 с.
10. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: учебник. – М.: КНОРУС, 2013. – 800 с.
11. Гендин Г. Всё о резисторах. Справочное издание. Выпуск 1239. – М.: Горячая линия – телеком. – 2000. – 200 с.
12. Берзан В.П. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 656 с.
13. Колпаков А.И. Электролитические конденсаторы. Особенности применения и надежность / А.И. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2000. – №6. – С. 22-39.
14. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: ДМК Пресс. – 2007. – 942 с.

© В.П. Матющенко, 2019