

УДК 621.316.718.5

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОСХемой УНИВЕРСАЛЬНОГО ТАЙМЕРА АНАЛОГОВЫМ СИГНАЛОМ

*И.Ю. Кузнецов*

Рассмотрена возможность управления аналоговым сигналом микросхемой универсального таймера в качестве генератора прямоугольных импульсов. Предложена схема генератора прямоугольных импульсов, совместимая для управления цифро-аналоговыми преобразователями транзисторно-транзисторной логики, реализующая диапазон выходной частоты, равный диапазону шагов шаговых двигателей. Установлено отношение максимального значения к минимальному значению частоты выходного сигнала, а также линейная зависимость между значением параметров время задающей цепи и смещением диапазона выходных частот. Найдена математическая модель, описывающая зависимость значения частоты на выходе предложенного генератора от уровня управляющего сигнала, а также относительная ошибка этой модели.

*Ключевые слова:* универсальный таймер; NE555; аналоговый сигнал; генератор прямоугольных импульсов; управление шаговыми двигателями.

---

## УНИВЕРСАЛДУУ ТАЙМЕРДИН МИКРОСХЕМАСЫН АНАЛОГДУК СИГНАЛ МЕНЕН БАШКАРУУ МҮМКҮНЧҮЛҮКТӨРҮНӨ ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ

*И.Ю. Кузнецов*

Бул макалада тик бурчтуу импульстардын генератору катары универсалдуу таймердин микросхемасын аналогдук сигнал менен башкаруу мүмкүнчүлүгү каралды. Кадамдык кыймылдаткычтарынын кадам диапазонуну барабар диапазон чыгаруу жыштыгын ишке ашыруучу транзистордук-транзистордук логиканы санарип-аналогдук кайра түзүүчүлөрдү башкаруу үчүн шайкеш келген тик бурчтуу импульстардын генераторунун схемасы сунушталды. Максималдуу маанинин чыгыш сигналынын жыштыгынын минималдуу маанисине болгон катышы, ошондой эле убакыт көрсөтүүчү чынжырдын параметрлеринин мааниси менен чыгыш жыштыгынын диапазонун жылдыруунун ортосундагы тилкелик көз карандылык белгиленди. Сунушталган генератордон чыгууда жыштыктын маанилеринин башкаруучу сигналдын деңгээлинен көз карандылыгын сүрөттөгөн математикалык модель табылды, ошондой эле ушул моделдин салыштырмалуу катасы аныкталды.

*Түйүндүү сөздөр:* универсалдуу таймер; NE555; аналогдук сигнал; тик бурчтуу импульстардын генератору; кадамдык кыймылдаткычтарды башкаруу.

---

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF CONTROL OF THE UNIVERSAL TIMER MICROCIRCUIT, ANALOGUE SIGNAL

*I.U. Kuznetsov*

The article discusses the possibility of controlling an analog signal by a universal timer microcircuit, as a generator of rectangular pulses. The proposed scheme of the generator of rectangular pulses, compatible for the control of digital-to-analog converters of transistor-transistor logic, realizing a range of output frequency equal to the range of steps of stepper motors. During the analysis, the ratio of the maximum value to the minimum value of the output signal frequency was established, and a linear relationship was established between the value of the parameters of the driving circuit time and the offset of the output frequency range. A mathematical model is found that describes the dependence of the frequency value at the output of the proposed generator on the level of the control signal, as well as the relative error of this model.

*Ключевые слова:* universal timer; NE555; analog signal; square wave generator; stepper motor control.

**Введение.** По имеющимся оценкам, примерно в 50 % современных промышленных роботов в качестве приводов используют шаговые двигатели [1]. В существующих устройствах управления шаговыми двигателями (далее – ШД) распределители импульсов, формирующие сигналы управления подачей на обмотки ШД, нуждаются в подаче прямоугольных импульсов. Для формирования этих импульсов используются генераторы, а также функциональные группы, преобразующие последовательность импульсов от генераторов в их последовательность с такими параметрами частоты и длительности, которые необходимы на входе распределителя импульсов [2].

Частота импульсов, приходящих в распределитель, равна частоте шагов шагового двигателя. Частота большинства шаговых двигателей, обмотки которых соединены как униполярные или биполярные, уместается в диапазон 150–3000 Гц [3]. Следует заметить, что минимальное значение диапазона может быть кратно меньше рассматриваемого, в данной работе оно выбрано из соображений исключения затухания момента. В работе [4] показано, что минимальная длительность импульса, необходимая для защёлкивания интегральной микросхемы составляет 1,5 мкс.

На сегодняшний день потребность в миниатюризации электронной аппаратуры, в частности, робототехнических комплексов и систем может быть достигнута за счет снижения масс-габаритных параметров управляющих устройств, а также за счёт снижения числа используемых в схемах элементов. Для устройств, использующих шаговые двигатели, миниатюризацию можно выполнить за счёт использования одного элемента в качестве генератора и преобразователя входных импульсов для управляющего ШД распределителем импульсов. Таким элементом может выступать микросхема универсального генератора, выходные параметры которой зависят от время задающей цепи с минимальным возможным числом элементов, такой как RC-цепь, а частота выходных импульсов, определяющая скорость шагов ШД, устанавливается уровнем входного, аналогового сигнала. Использование в качестве управляющего частотой генератора аналогового сигнала вполне рационально, из-за наличия встроенного ЦАП в широком спектре микроконтроллеров, используемых на РТК и РТС.

Управление перемещениями рабочего органа мехатронной системы заключается в подаче управляющего сигнала на приводы таким образом, чтобы реализовать необходимое перемещение. Необходимое перемещение находится решением обратной задачи кинематики; для нахождения уровня управляющего сигнала необходимо решить динамическую задачу мехатронной системы.

**Проблематика исследования.** Рассматривается задача создания генератора прямоугольных импульсов на базе микросхемы универсального таймера, управляемого аналоговым сигналом, реализующего диапазон частот, необходимый для управления шаговыми двигателями.

Цель работы – поиск и анализ принципиальной электрической схемы генератора прямоугольных импульсов на базе микросхемы универсального таймера с частотой на выходе 150–3000 Гц, и минимальной длительностью импульса – 1,5 мкс.

Для решения динамической задачи необходимо найти уравнение, описывающее зависимость между уровнем поданного на генератор управляющего сигнала и частотой следований импульсов на его выходе. Ещё одна задача – создание математической модели, описывающей зависимость частоты выходного сигнала от уровня входного аналогового сигнала.

**Материалы и методы.** В качестве универсального таймера была выбрана микросхема 555. Выбор обусловлен широким ее распространением, а также наличием вывода управления, подачей сигнала на который устанавливаются пороги останова и запуска выходного сигнала. Рассматривалась виртуальная модель микросхемы без учета конкретного производителя и корпуса. Напряжение питания выбранной микросхемы составляет 5 В постоянного тока, это же значение является верхним уровнем управляющего аналогового сигнала [5].

Эксперимент проводили в среде моделирования «Falstad» (Falstad URL: <http://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html> (дата обращения: 1.9.2020)). Интерфейс среды моделирования представлен на рисунке 1.

Для каждой исследуемой схемы было проведено 20 экспериментов, в которых изменялся уровень управляющего сигнала с шагом 0,25 В. Дискретность напряжения управляющего сигнала определялась

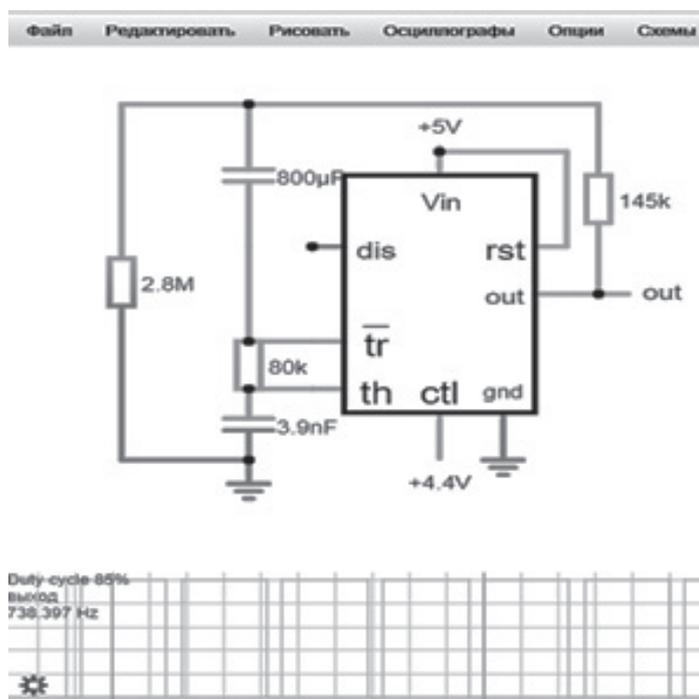


Рисунок 1 – Интерфейс программы моделирования «Falstad»

возможностями контроллера, было выбрано значение, доступное большинству контроллеров. Учитывали следующие параметры выходного сигнала: частоту, время от появления фронта импульса до его спада, коэффициент заполнения, период.

Параметры RC-цепи, реализующей необходимый частотный диапазон, подбирали эмпирическим путём.

Описание и результаты экспериментов на схеме с одной RC-цепью. Первая рассматриваемая в эксперименте схема представлена на рисунке 2.

Номиналы RC-цепи первой схемы были подобраны таким образом, чтобы при отсутствии сигнала на выводе 5, частота сигнала на выводе микросхемы была примерно равна 1 КГц, а именно  $R_1 = 100$  КОм,  $C_1 = 6.8$  нФ. Расчёт параметров проведен по формуле:

$$F_{free} = \frac{0.72}{R_1 * C_1}, \quad (1)$$

где  $F_{free}$  – частота выходного сигнала при отсутствии управляющего сигнала (Гц);  $R_1$  – номинальное значение сопротивления резистора  $R_1$  (Ом);  $C_1$  – номинальное значение ёмкости конденсатора  $C_1$  (Ф).

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

По данным таблицы 1 был составлен график зависимости частоты от управляющего сигнала (рисунок 3).

Результаты эксперимента показали, что при смещении полученного значения по формуле (1), диапазон сместится с той же характеристикой. На промежутке от 0,25 до 0,75 В график частоты повторяет себя в диапазоне примерно от 0,75 до 1,5 В. С целью уточнения найденной зависимости был проведён второй эксперимент на той же схеме, но с параметрами RC-цепи:  $R_1 = 50$  Ком и  $C_1 = 6,8$  нФ, при которых  $F_{free}$  второго эксперимента равен удвоенному значению  $F_{free}$  первого эксперимента, а именно 2000 Гц. Результаты эксперимента, а также график зависимости представлены в таблице 2 и на рисунке 4.

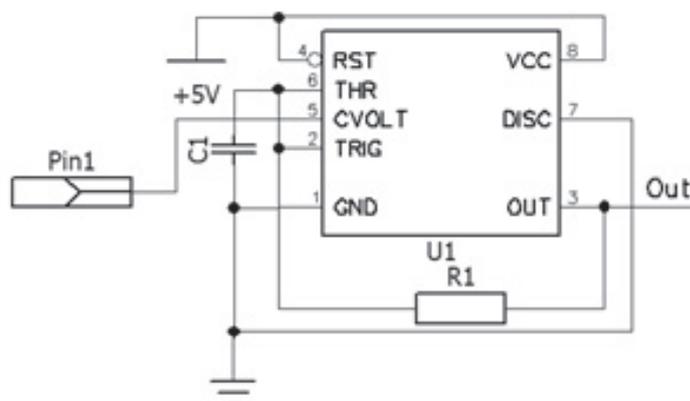


Рисунок 2 – Электрическая принципиальная схема, рассматриваемая в первых экспериментах

Таблица 1 – Значения выходного сигнала при  $R1 = 100 \text{ КОм}$ ,  $C1 = 6.8 \text{ нФ}$ , по схеме рисунка 2

№	T (ms)	V <sub>упр</sub> (В)	F (Гц)	T1 (ms)	Коэф. Зап.
1	0.625	0.25	1600	0.025	0.04
2	0.540	0.5	1852	0.040	0.07
3	0.575	0.75	1739	0.065	0.11
4	0.585	1	1709	0.085	0.15
5	0.600	1.25	1667	0.110	0.18
6	0.630	1.5	1587	0.140	0.22
7	0.660	1.75	1515	0.170	0.26
8	0.680	2	1471	0.200	0.29
9	0.725	2.25	1379	0.240	0.33
10	0.770	2.5	1299	0.285	0.37
11	0.800	2.75	1250	0.330	0.41
12	0.870	3	1149	0.385	0.44
13	0.935	3.25	1070	0.455	0.49
14	1.015	3.5	985	0.535	0.53
15	1.108	3.75	902	0.626	0.57
16	1.233	4	811	0.752	0.61
17	1.395	4.25	717	0.907	0.65
18	1.640	4.5	610	1.164	0.71
19	2.080	4.75	481	1.602	0.77
20	-	5	-	-	-

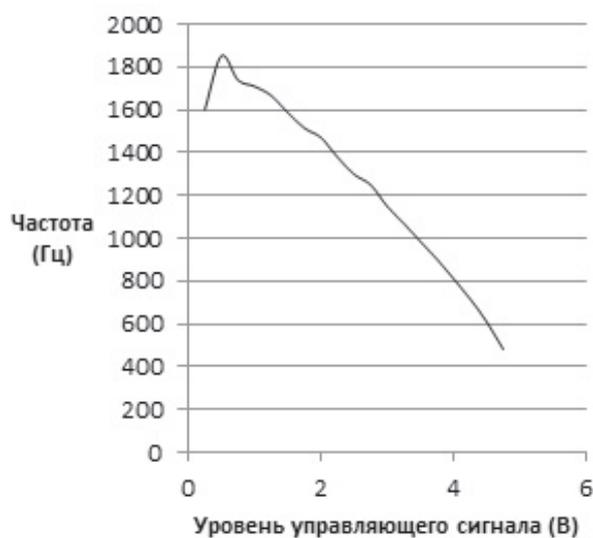


Рисунок 3 – Зависимость частоты выходного сигнала от управляющего напряжения при  $R1 = 100 \text{ КОм}$ ,  $C1 = 6.8 \text{ нФ}$ , по схеме рисунка 2

Таблица 2 – Значения выходного сигнала при  $R1 = 50 \text{ Ком}$  и  $C1 = 6,8 \text{ нФ}$ , по схеме на рисунке 2

№	T (ms)	Vупр (В)	F (Гц)	T1 (ms)	Ко-эф. Зап.
1	1.070	0.25	935	0.032	0.03
2	1.083	0.5	924	0.075	0.07
3	1.094	0.75	914	0.120	0.11
4	1.130	1	885	0.158	0.14
5	1.176	1.25	850	0.211	0.18
6	1.230	1.5	813	0.258	0.21
7	1.285	1.75	778	0.321	0.25
8	1.292	2	774	0.374	0.29
9	1.427	2.25	701	0.470	0.33
10	1.515	2.5	660	0.545	0.36
11	1.605	2.75	623	0.642	0.40
12	1.718	3	582	0.756	0.44
13	1.852	3.25	540	0.888	0.48
14	2.012	3.5	497	1.046	0.52
15	2.208	3.75	453	1.236	0.56
16	2.457	4	407	1.523	0.62
17	2.786	4.25	359	1.810	0.65
18	3.289	4.5	304	2.302	0.70
19	4.167	4.75	240	3.208	0.77
20	-	5	-	-	-

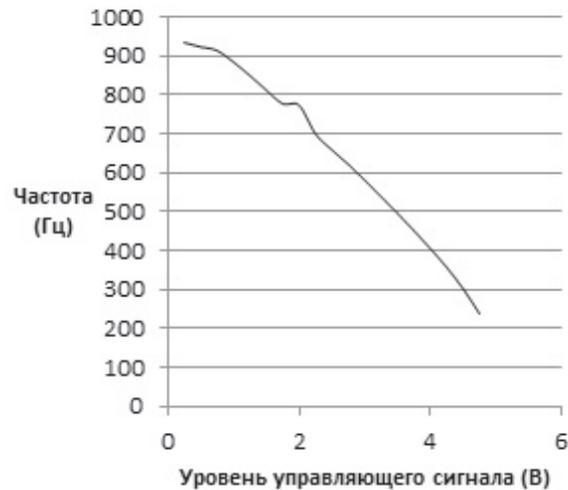


Рисунок 4 – Зависимость частоты выходного сигнала от управляющего напряжения при  $R1 = 50$  Ком и  $C1 = 6,8$  нФ, по схеме на рисунке 2

Графики на рисунках 3 и 4 показывают, что частота при уровне управляющего сигнала  $2/3$  от напряжения питания, равна значению рассчитанному по формуле (1). Эта корреляция указывает на соотношение значений сопротивлений резисторов, входящих в резистивный делитель микросхемы 555.

Данные второго эксперимента указывают на существование линейной зависимости смещения диапазона частот выходного сигнала, от смещения значений время задающей цепи. Также доказано существование линейной зависимости между значением частоты выходного сигнала и уровня управляющего напряжения. Это подтверждается уравнением:

$$\frac{F_{1.free}}{F_{2.free}} = \frac{F_{1.min}}{F_{2.min}} = \frac{F_{1.max}}{F_{2.max}} = 0,5, \quad (2)$$

где  $F_{1.free}$  – частота при отсутствии входного сигнала в первом эксперименте (Гц);  $F_{2.free}$  – то же во втором эксперименте (Гц);  $F_{1.min}$  – минимальная частота, зафиксированная в первом эксперименте (Гц);  $F_{2.min}$  – то же во втором эксперименте (Гц);  $F_{1.max}$  – максимальная частота, зафиксированная в первом эксперименте (Гц);  $F_{2.max}$  – то же во втором эксперименте (Гц).

Разница минимального и максимального значения зафиксированного диапазона частот рассчитывается по уравнению:

$$\frac{F_{1.max}}{F_{1.min}} = \frac{F_{2.max}}{F_{2.min}} = 3,85. \quad (3)$$

Значение, полученное по формуле (3), говорит о невозможности использования схемы, представленной на рисунке 2, для получения необходимого диапазона частот, заявленного как цель исследования, так как разница искомого диапазона составляет:

$$\frac{F_{max}}{F_{min}} = \frac{3000}{150} = 20,$$

где  $F_{max}$  – максимальное значение диапазона частот, необходимое для исследования (Гц);  $F_{min}$  – минимальное значение диапазона частот, необходимое для исследования (Гц).

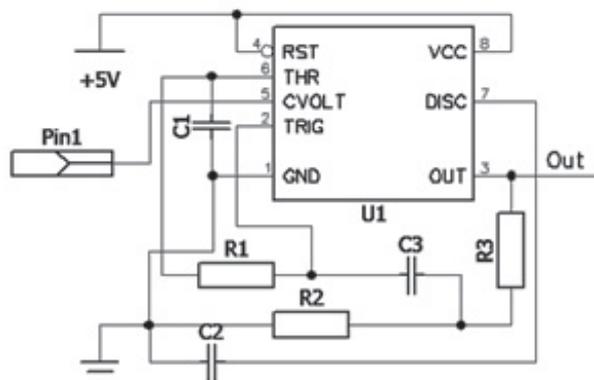


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема третьего эксперимента

**Описание и результаты экспериментов на схеме с двумя RC-цепями.** Проведенные эксперименты показали, что для достижения цели исследования необходимо изменить принципиальную электрическую схему, показанную на рисунке 2, на схему, расширяющую диапазон частоты выходного сигнала за счёт «среза» некоторого уровня управляющего сигнала при его прохождении по время задающему контуру. Данное воздействие на управляющий сигнал реализуется путём введения в схему резистивного делителя и также снаббера, входящего в состав делителя. Схема, реализующая необходимый диапазон, представлена на рисунке 5.

Параметры схемы на рисунке 5 подобраны эмпирическим путём и равны:  $R1 - 2,8 \text{ МОм}$ ,  $R2 - 50 \text{ кОм}$ ,  $C1 - 80 \text{ нф}$ ,  $C2 - 20 \text{ нф}$ ,  $C3 - 800 \text{ мкф}$ .

Данные проведённого эксперимента, представленные в таблице 3, показывают, что схема на рисунке 5 с параметрами, указанными выше, полностью удовлетворяет заявленному диапазону.

График зависимости частоты выходного сигнала от уровня управляющего напряжения по данным таблицы 3, представлен на рисунке 6.

График на рисунке 6 имеет ту же особенность, что и график на рисунке 3, т. е. превращение линейной функции в параболу на участке, экстремум которого находится на напряжении управляющего сигнала в  $0,75 \text{ В}$ . Принимая во внимание график на рисунке 6, следует устанавливать пределы уровня управляющего сигнала от  $0,75$  до  $4,75 \text{ В}$ . Так как более низкий уровень сигнала приведёт к повтору значений при соблюдении заданного диапазона. Уровень сигнала, превышающий максимальное значение диапазона, приведёт к полному заполнению периода импульсом – уровень сигнала будет константным.

По данным таблицы 3 время существования импульса, генерируемое исследуемой микросхемой на выходе, при соблюдении указанного рационального диапазона – не менее  $0,039 \text{ мс}$ , превышает требуемое значение в 185 раз, а значит, полностью соответствует цели исследования.

Для взаимосвязи устройства управления шаговыми двигателями и контроллера, а также уточнения рационального диапазона уровня управляющего сигнала, необходимо найти математические уравнения, описывающие зависимость частоты выходного сигнала от уровня управляющего сигнала.

Как было отмечено ранее, частота выходного сигнала находится в линейной зависимости от напряжения управляющего сигнала, однако это утверждение справедливо не для всего диапазона значений. Возникновение локальных экстремумов вызвано неидеальностью инструментов исследования. Для расчёта выходных сигналов было принято решение использовать полиномиальное уравнение пятой степени, описывающее обучающую выборку, так как такое уравнение позволяет учесть до четырёх экстремумов.

На рисунке 7 показан график полиномиального уравнения пятой степени, описывающего зависимость частоты выходного сигнала от уровня управляющего сигнала.

Математическая модель (рисунок 7), имеет следующий вид:

Таблица 3 – Значения выходного сигнала по схеме на рисунке 5

№	T (ms)	V <sub>упр</sub> (В)	F (Гц)	T1 (ms)	Ко-эф. Зап.
1	0.302	0.25	3306	0.013	0.05
2	0.283	0.5	3534	0.025	0.09
3	0.279	0.75	3590	0.039	0.14
4	0.287	1	3485	0.051	0.18
5	0.295	1.25	3390	0.067	0.23
6	0.300	1.5	3333	0.084	0.28
7	0.318	1.75	3143	0.101	0.32
8	0.345	2	2899	0.127	0.37
9	0.365	2.25	2740	0.153	0.42
10	0.395	2.5	2532	0.183	0.47
11	0.435	2.75	2299	0.221	0.51
12	0.478	3	2093	0.268	0.56
13	0.530	3.25	1887	0.323	0.61
14	0.609	3.5	1641	0.402	0.66
15	0.708	3.75	1412	0.502	0.71
16	0.855	4	1170	0.649	0.76
17	1.087	4.25	920	0.880	0.81
18	1.546	4.5	647	1.329	0.86
19	6.536	4.75	153	6.209	0.95
20	-	5	-	-	-

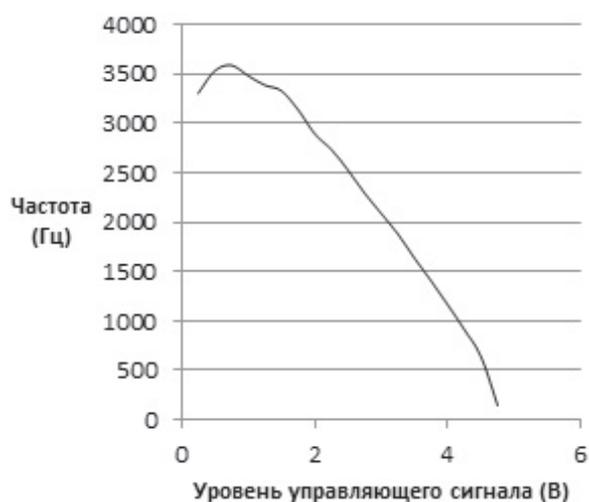


Рисунок 6 – Зависимость частоты выходного сигнала от управляющего напряжения, полученные по схеме на рисунке 5

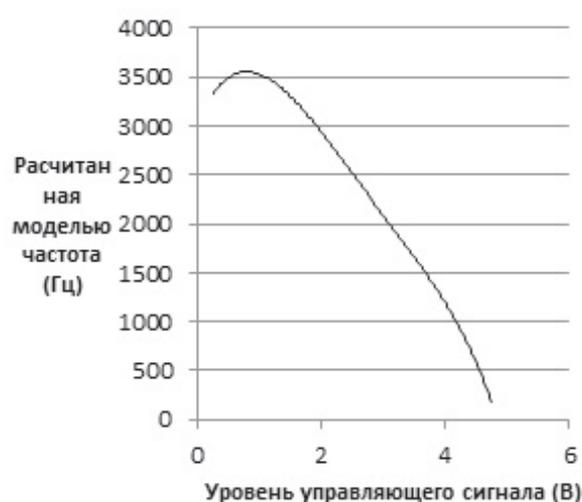


Рисунок 7 – Зависимость частоты выходного сигнала от напряжения управляющего сигнала, полученная математической моделью, описывающей результаты третьего эксперимента

Таблица 4 – Относительная ошибка математического уравнения, описывающая третий эксперимент

U (В)	F <sub>l</sub> (Гц)	F (Гц)	Ошибка $\delta$	Сред. ошибка
0.75	3541.49	3590	1.37	2.137
1.60	3225.35	3239	0.42	
1.70	3155.12	3198	1.36	
1.95	2963.70	2941	0.77	
2.20	2757.56	2764	0.23	
2.50	2501.76	2528	1.05	
2.81	2236.44	2263	1.19	
3.42	1718.50	1724	0.32	
3.84	1340.66	1325	1.17	
4.42	688.133	738	7.25	
4.75	175.730	161	8.38	

$$F^l = -1.4169 \cdot U_{\text{con}}^5 - 11.051 \cdot U_{\text{con}}^4 + 237.49 \cdot U_{\text{con}}^3 - 1148.3 \cdot U_{\text{con}}^2 + 1398.2 \cdot U_{\text{con}} + 3052.4, \quad (4)$$

где  $F^l$  – значение частоты выходного сигнала, рассчитываемое моделью;  $U_{\text{con}}$  – уровень управляющего сигнала.

Для подтверждения рациональности модели следует установить  $\delta$  – отклонение рассчитанного выходного параметра от реально полученного значения. Расчёт относительной ошибки проводится по формуле:

$$\delta = \frac{|F^l_i - F_i|}{F^l_i} \times 100\%, \quad (5)$$

где  $F^l_i$  – значение, рассчитанное моделью (4), результат выходного параметра по  $i$  обучающей выборке;  $F_i$  – реально полученное значение в  $i$  обучающей выборке третьего эксперимента.

Были использованы граничные и средние значения данных обучающей выборки (таблица 3), а также сгенерированные случайные значения рационального диапазона, образующие вместе входные данные таблицы расчёта ошибки. Результаты расчёта и выборка, по которой рассчитывается относительная ошибка и средняя относительная ошибка, представлены в таблице 4.

Результаты проверки ошибки расчётов математической модели доказали, что модель приемлема по допуску инженерной ошибки, так как все итерации проверки, а также среднее значение ошибки меньше максимально рекомендуемых для инженерных расчётов 10 % [6]. Начиная со значения входного сигнала в 3,84 В, наблюдается рост ошибки, на графике рисунка 7 этот участок имеет ровную форму без локальных экстремумов; это говорит о «растяжке» доступного диапазона реализуемой за счёт введения R2 и C3 с рисунка 5, на отрезке от 3,84 до 4,75 В.

Уменьшение ошибки значений, получаемых моделью, возможно при использовании методов линейной регрессии с использованием градиентного спуска для поиска коэффициентов.

**Заключение.** Результаты, полученные в ходе эксперимента, указывают на широкий спектр возможностей управления периодом и коэффициентом заполнения выходного сигнала микросхемы 555, по уровню аналогового сигнала, приходящего на 5 вывод микросхемы – «Control volt». Получена математическая модель, описывающая зависимость выходных параметров микросхемы (4), для предложенной электрической принципиальной схемы с используемыми номиналами (рисунок 5) при напряжении питания микросхемы 5 В. Доказана зависимость диапазонов выходных параметров от номинала RC-цепи. Установлено, что в схеме с одной RC-цепью, разность крайних значений частоты составляет 3,85. Предложена схема расширения диапазона.

Результаты, полученные в ходе исследования, будут использованы при разработке контроллера управления ШД, а также при разработке алгоритмов управления последним.

*Литература*

1. *Иванов А.А.* Основы робототехники / А.А. Иванов. 2-е изд. М.: ИНФРА-М, 2017. С. 46.
2. *Кузнецов И.Ю.* Анализ схем четырехтактного распределителя импульсов для управления шаговым двигателем / И.Ю. Кузнецов, В.А. Детистов // Молодой исследователь Дона. 2020. № 1. С. 37–41.
3. *Капля В.И.* Распределенное управление группой шаговых двигателей на основе многоканальных приёмопередатчиков / В.И. Капля, Д.И. Казаков, А.П. Коротков // Инженерный вестник Дона. 2020. № 5. С. 19.
4. *Гадоев С.М.* Температурная зависимость параметров эффекта защёлкивания интегральных микросхем / С.М. Гадоев // Вестник КРСУ. 2017. Т. 7. № 8. С. 5–7.
5. Управление низковольтной мощной нагрузкой от микроконтроллера с использованием микросхемы 555 // Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2. С. 103–107.
6. *Аввакумов В.Д.* Точность инженерных расчетов, выполняемых с учетом допусков / В.Д. Аввакумов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 7. С. 22–28.