

## ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ИНТЕГРИРУЮЩИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ШИМ

Россия, г. Пенза, Пензенский государственный технологический университет

*In the field of analog-to-digital converters based on pulse-width modulation, the newest and most promising are ADCs with two additional deploying functions. The methods and corresponding devices of the ADC, proposed in two patents of the Russian Federation, make them promising for the domestic industry in solving problems of import substitution in the field of measuring devices. In the work, simulation models are created in the Matlab / Simulink environment and the methodological error of these devices is assessed.*

Аналого-цифровые преобразователи двухтактного и многотактного интегрирования считаются морально устаревшими и с начала 2000-х годов полностью вытеснены сигма-дельта аналого-цифровыми преобразователями ( $\Sigma\Delta$ -АЦП). Данные АЦП является сугубо зарубежной разработкой и практически не выпускаются отечественными разработчиками.

В системах контроля технологических процессов производства в мониторинговых телеметрических системах и ряде других областей используются измерительные преобразователи на основе частотно-импульсной модуляции и широтно-импульсной модуляции. В классе интегрирующих преобразователей напряжения в интервал времени наиболее современными и перспективными для отечественной промышленности являются интегрирующие АЦП на основе широтно-импульсной модуляции с одной и двумя дополнительными развертывающими функциями [1-3].

С целью определения потенциальных характеристик по точности и быстродействию синтезируем имитационные модели устройств реализующих данные способы преобразования. Разработанная модель АЦП на основе ШИМ с одной дополнительной развертывающей функцией [4] в среде *Matlab/Simulink* представлена на рисунке 1.

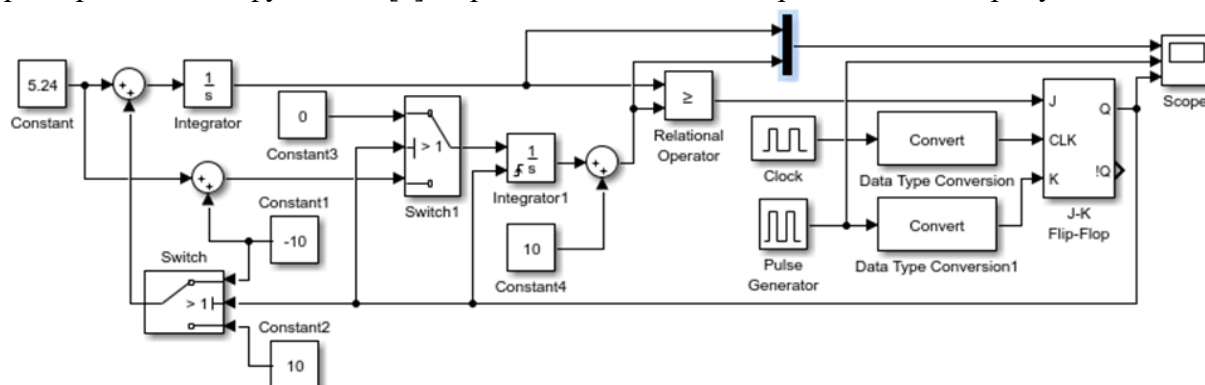
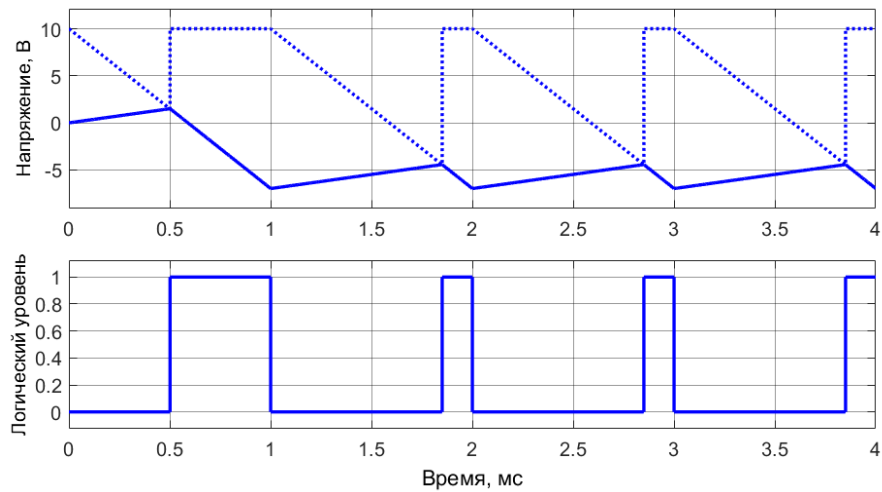
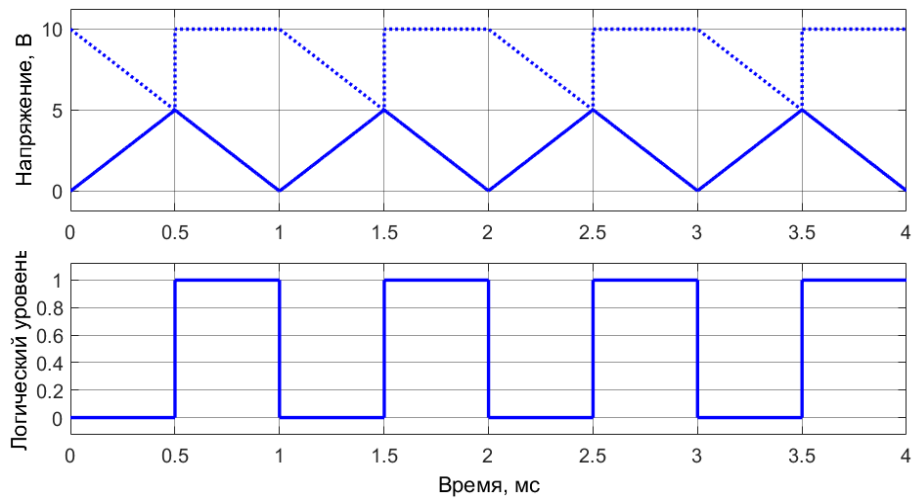


Рисунок 1 – *Simulink* - модель АЦП на основе ШИМ с одной дополнительной развертывающей функцией

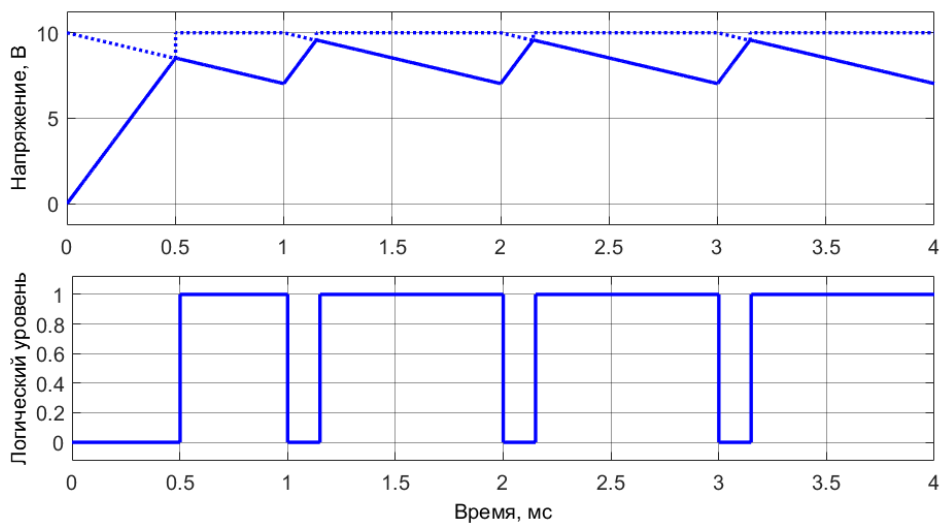
На рисунке 2 приведены временные диаграммы работы модели: графики основной (сплошная линия) и дополнительной (пунктирная линия) развертывающих функций и результирующий ШИМ-сигнал, для трех различных значений входного напряжения, соответствующих началу, середине и концу входного диапазона. Графики получены для идеальных характеристик интеграторов, то есть постоянная времени первого интегратора равнялась постоянной времени второго ( $\tau_{n1} = \tau_{n2}$ ).



а) Условия моделирования:  $U_x = -7\text{В}$ ;  $U_0 = \pm 10\text{В}$ ;  $U_{\text{П}} = 10\text{В}$ .



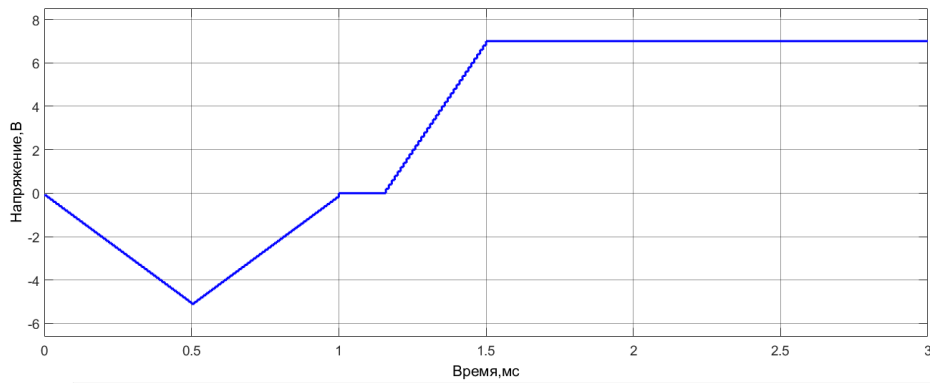
б) Условия моделирования:  $U_x = 0\text{В}$ ;  $U_0 = \pm 10\text{В}$ ;  $U_{\text{П}} = 10\text{В}$ .



в) Условия моделирования:  $U_x = 7\text{В}$ ;  $U_0 = \pm 10\text{В}$ ;  $U_{\text{П}} = 10\text{В}$ .

Рисунок 2 – Временная диаграмма работы *Simulink* – модели АЦП на основе ШИМ с одной дополнительной развертывающей функцией

На рисунке 3 показаны графики переходного процесса при формировании результата преобразования. Видно, что концу второго интервала интегрирования  $T_0$  переходный процесс заканчивается и может быть получен результат преобразования.



а)  $U_x=7\text{В}$

Рисунок 3 – График переходного процесса установления результата преобразования

Для оценки методической погрешности преобразования выполнено моделирование в диапазоне входных напряжений. На вход модели подавались постоянные значения входного напряжения в диапазоне от -9В до 9В с шагом 0.001В. Длительность интервала преобразования  $T_n$  задавалась равной 10 интервалам интегрирования  $T_0$ , длительность такта синхронизации компараторов задавалась равной  $T_0/100$ . Графики распределения погрешности в начале и конце диапазона входных напряжений, представлены на рисунке 4.

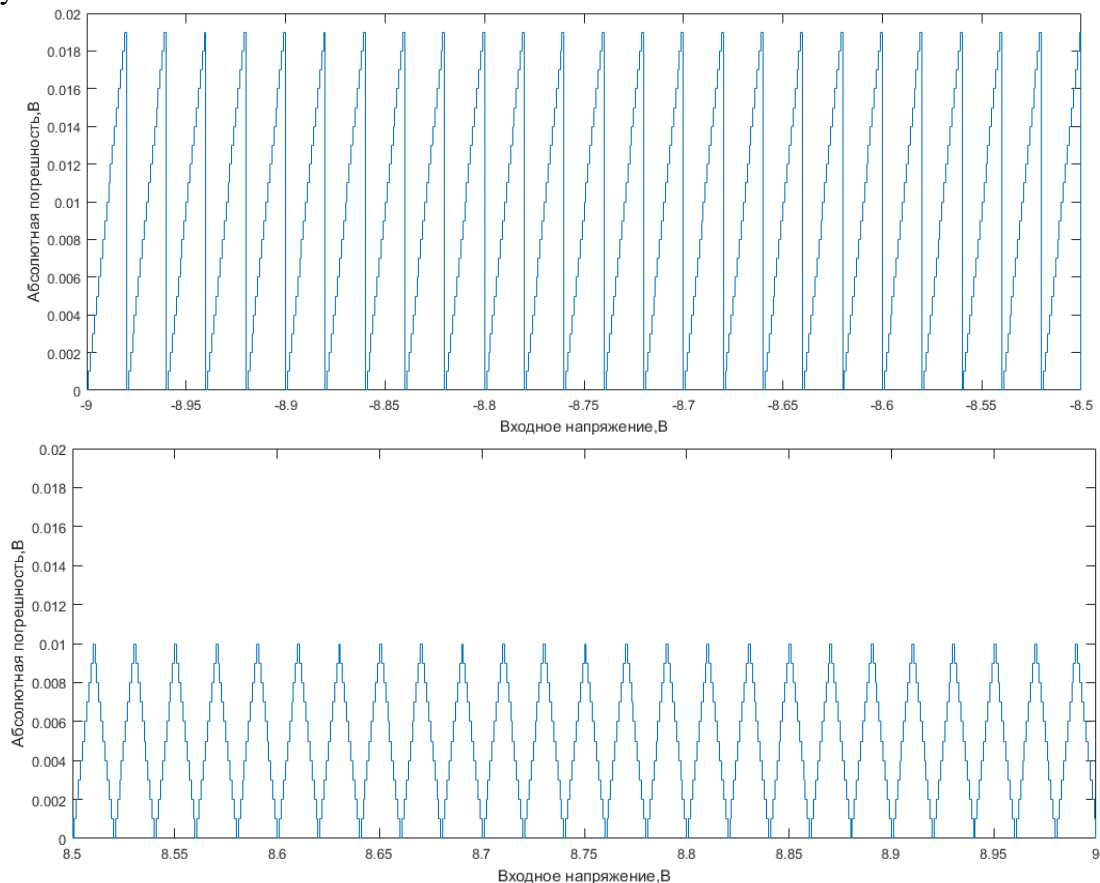


Рисунок 4 – Распределение погрешности преобразования по диапазону входных напряжений в установившемся режиме (условия моделирования:  $U_x = -9\text{В}$  до  $9\text{В}$  с шагом  $1\text{мВ}$ ;  $U_0 = \pm 10\text{В}$ ;  $U_n = 10\text{В}$ ,  $\tau=1$ )

Максимальная погрешность равна  $\Delta U_{max} = 0,02\text{В}$ , среднее значение погрешности на диапазоне  $\Delta U = 0,01\text{В}$ .

На представленных на рисунке 2 временных диаграммах длительность интервала интегрирования  $T_0 = 1\text{мс}$ , это величина определяется быстродействием ОУ интегратора, временами срабатывания коммутирующих элементов, быстродействием компараторов. Из перечисленных элементов на современном этапе развития радиоэлектронной техники наименьшим быстродействием обладают ОУ. В рамках выполняемой работы не рассматриваются быстродействующие ОУ, так как по характеристикам собственных шумов, напряжению смещения, дрейфу токов и напряжений они не соответствуют требованиям к элементам АЦП.

Разработанная модель АЦП на основе ШИМ с двумя дополнительными развертывающими функциями [3] в среде *Matlab/Simulink* представлена на рисунке 5.

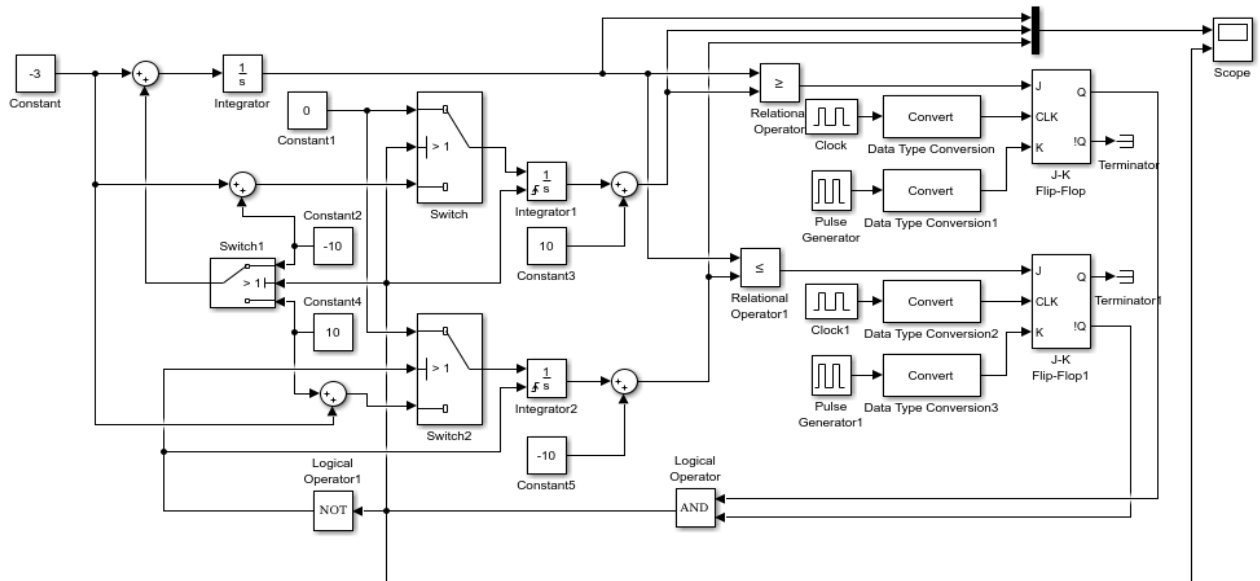


Рисунок 5 – *Simulink* -модель АЦП на основе ШИМ с двумя дополнительными развертывающими функциями

Для сравнения характеристик моделей АЦП на основе ШИМ с одной и двумя дополнительными развертывающими функциями выполнено имитационное моделирование. Увеличение точности преобразования достигалось за счет увеличения количества интервалов  $T_0$  на интервале преобразования  $T_{\Pi} = KT_0$ , данный коэффициент  $K$  аналогично теории сигма-дельта преобразования будем называть коэффициентом передискретизации.

Результаты моделирования представлены в таблице 1. В ходе моделирования на вход каждой из моделей подавались постоянные входные напряжения в диапазоне от -9В до 9В с шагом 1мВ. Данный диапазон соответствует 90% входного диапазона моделей. Вычислялся результат преобразования и соответствующая абсолютная погрешность. Затем оценивались ее максимальное и среднее значения. Эффективная разрядность рассчитывалась по максимальному значению погрешности.

Таблица 1 – Результаты моделирования

$F_{\text{д}}$ , кГц	К	С одной дополнительной развертывающей функцией			С двумя дополнительными развертывающими функциями		
		$\max \Delta U, \text{В}$	Среднее $\Delta U, \text{В}$	$N$ , бит	$\max \Delta U, \text{В}$	Среднее $\Delta U, \text{В}$	$N$ , бит
10	50	0,095	0,045	7	0,045	0,023	8
5	100	0,047	0,022	8	0,023	0,011	9
2	250	0,025	0,013	9	0,012	0,006	10
1	500	0,017	0,008	10	0,008	0,004	11

В таблице 1, где  $F_d$  – частота дискретизации входного сигнала,  $K$  – коэффициент передискретизации,  $N$  – эффективная разрядность.

Таким образом, результаты имитационного моделирования подтверждают большую эффективность АЦП на основе ШИМ с двумя дополнительными развертывающими функциями по критерию точность/быстродействие.

1. Шахов Э.К. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения Текст. / В.Д. Михотин, Э.К. Шахов — М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.

2. Пат. 2294595 Российская Федерация, МПК Н 03 М 1/52 (2006.01). Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / 185 А.И. Надеев, Э.К. Шахов, В.Н. Ашанин; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет. – № 2005118265/09; заявл. 14.06.2005; опубл. 27.02.2007. – 10 с.

3. Патент №2457617 РФ. «Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения» / Куц А.В., Михеев М.Ю., Пискаев К.Ю., Юрманов В.А. // Пензенская государственная технологическая академия правообладатель. – Заявл. – 03.08.2011 зарег. 27.07.2012 – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

4. Шахов Э.К. Реализация концепций  $\Delta\Sigma$ -АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции / Э.К. Шахов, В.Н. Ашанин, А.И. Надев // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. – 2006. – №6. – С.226-237.