

8.2. Лабораторная работа № 8. Моделирование электромагнита с учетом изменения геометрии магнитной цепи

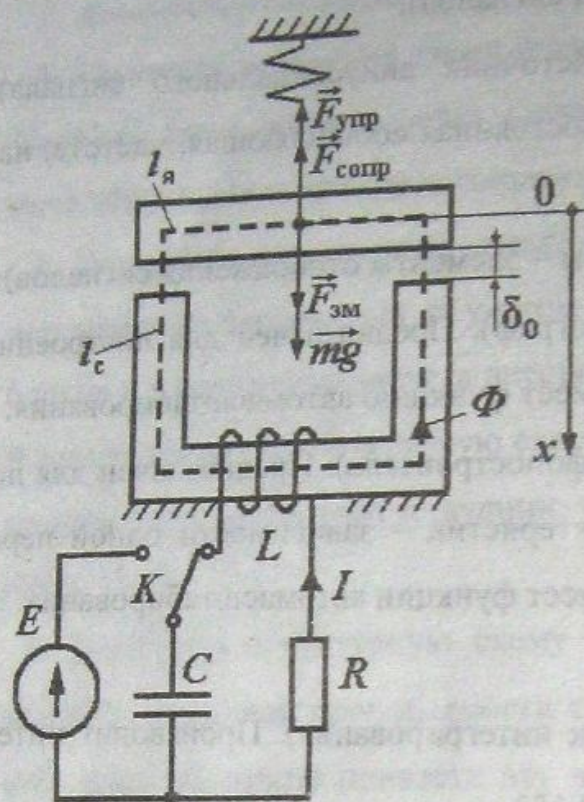


Рис. 8.6. Расчетная схема электромагнита с учетом изменения воздушного зазора

Таблица 8.4

Параметр	Обозначение
Сечение стержня, м ²	S
Длина стержня, м	l_c
Число витков	w
Сопротивление, Ом	R
Начальный воздушный зазор, м	δ_0
Масса якоря, кг	m
Коэффициент жесткости пружины, Н/м	$k_{упр}$
Напряжение заряда конденсатора, В	$U_{снач}$
Емкость конденсатора, мкФ	C
Сила сопротивления, Н	$F_{сопр}$

Рассматривается случай питания обмотки электромагнита от предварительно заряженной конденсаторной батареи. Сопротивление R учитывает активное сопротивление обмотки электромагнита и соединительных проводов. Считаем, что при протекании магнитного потока насыщения магнитопровода не происходит, то есть магнитная индукция изменяется в пределах линейной части кривой намагничивания. При протекании магнитного потока воздушный зазор между якорем и сердечником изменяется. Таким образом, нелинейность схемы обусловлена изменением геометрии магнитной цепи, а именно, изменением магнитного сопротивления воздушного зазора. Это, в свою очередь, приводит к изменению индуктивности обмотки электромагнита.

Рассматриваемое устройство является электромеханическим преобразователем энергии. Преобразование энергии производится как в прямом, так и в обратном направлениях. Первоначально запасенная в конденсатор-

ной батарее электрическая энергия за исключением потерь в активном сопротивлении преобразуется в энергию магнитного поля. За исключением потерь на наведение вихревых токов энергия магнитного поля преобразуется в механическую энергию – кинетическую энергию движущегося якоря и потенциальную энергию упругой деформации пружины. За исключением механических потерь механическая энергия преобразуется обратно в энергию магнитного поля и затем в электрическую энергию.

Для построения структурной схемы такого устройства целесообразно описать электрическую часть, механическую часть, а для магнитной части привести уравнения, связывающие электрические и механические величины.

Электрическая цепь разряда конденсатора содержит один контур и описывается одним уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа,

$$u_C + u_L + u_R = 0, \quad (8.11)$$

где напряжение на емкости

$$u_C = \frac{1}{C} \int i \, dt + U_{C0}, \quad (8.12)$$

напряжение на катушке

$$u_L = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt}; \quad (8.13)$$

поскольку и индуктивность, и ток изменяются во времени, напряжение на активном сопротивлении

$$u_R = R i. \quad (8.14)$$

После преобразования уравнений (8.11) – (8.14) и введения операторов дифференцирования p и интегрирования $\frac{1}{p}$ получаем уравнения для построения структурной схемы электрической цепи электромагнита:

$$u_c + u_L + u_R = 0,$$

$$u_c = \frac{i}{C p}, \quad (8.15)$$

$$u_L = L p i,$$

$$u_R = R i.$$

Согласно уравнениям (8.15) строим структурную схему электрической цепи электромагнита (рис. 8.7).

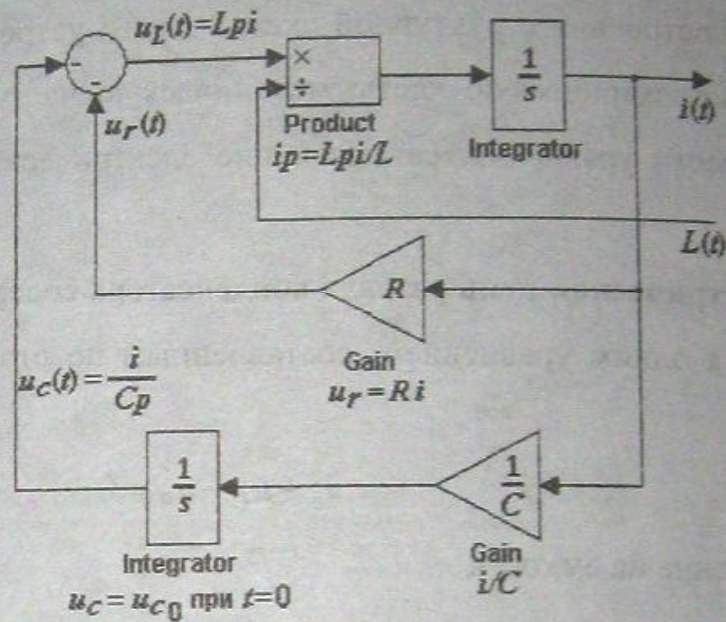


Рис. 8.7. Структурная схема электрической цепи электромагнита

Уравнение электрического равновесия (8.11) реализовано с помощью сумматора, выходным сигналом с которого является напряжение на обмотке. Начальное напряжение заряда конденсаторной батареи задается как начальное условие в параметрах интегратора в нижней ветви. Структурная схема электрической цепи связана со структурными схемами магнитной и механической частей посредством выходного сигнала – тока и входного сигнала – индуктивности.

Механическая часть представляет собой якорь электромагнита, имеющий линейное направление движения (вдоль оси Ox), под действием четырех сил.

Сила тяжести – mg – имеет положительное направление, постоянна

по величине, поскольку масса не меняется.

Сила притяжения якоря и сердечника (электромагнитная сила) – $F_{эм}$ – имеет положительное направление, ее величина пропорциональна квадрату магнитной индукции в зазоре.

Сила упругости пружины

$$F_{упр} = -\kappa_{упр}x, \quad (8.16)$$

имеет направление, обратное знаку координаты, и величину, пропорциональную модулю координаты.

Сила сопротивления среды (сила трения). Для невязкой среды имеет постоянную величину, направление противоположно направлению скорости якоря

$$F_{сопр} = \text{sign}(V) \cdot |F_{сопр}|. \quad (8.17)$$

Для вязкой среды, как правило, величина пропорциональна квадрату скорости, направление противоположно направлению скорости якоря

$$F_{сопр} = -\kappa_{сопр} \cdot V^2. \quad (8.18)$$

Предположим, что мы имеем дело с невязкой средой.

Запишем баланс сил по второму закону Ньютона для начального момента времени, когда скорость и координата положительны, а сила сопротивления и сила упругости отрицательны

$$F_{эм} + mg - F_{сопр} - F_{упр} = (ma = F_{дин}). \quad (8.19)$$

Скорость якоря

$$V = \int a \, dt. \quad (8.20)$$

Координата якоря

$$x = \int V \, dt. \quad (8.21)$$

Для расчета магнитной индукции, индуктивности необходимо знать мгновенное значение величины воздушного зазора

$$\delta = \delta_0 - x. \quad (8.22)$$

Таким образом, для построения структурной схемы механической

части используются следующие уравнения, записанные в операторной форме:

$$F_{эм} + mg - F_{сопр} - F_{упр} = (ma = F_{дин}),$$

$$F_{сопр} = \text{sign}(V) \cdot |F_{сопр}|,$$

$$F_{упр} = -\kappa_{упр}x, \tag{8.23}$$

$$V = \frac{a}{p},$$

$$x = \frac{V}{p},$$

$$\delta = \delta_0 - x.$$

Структурная схема механической части показана на рис. 8.8.

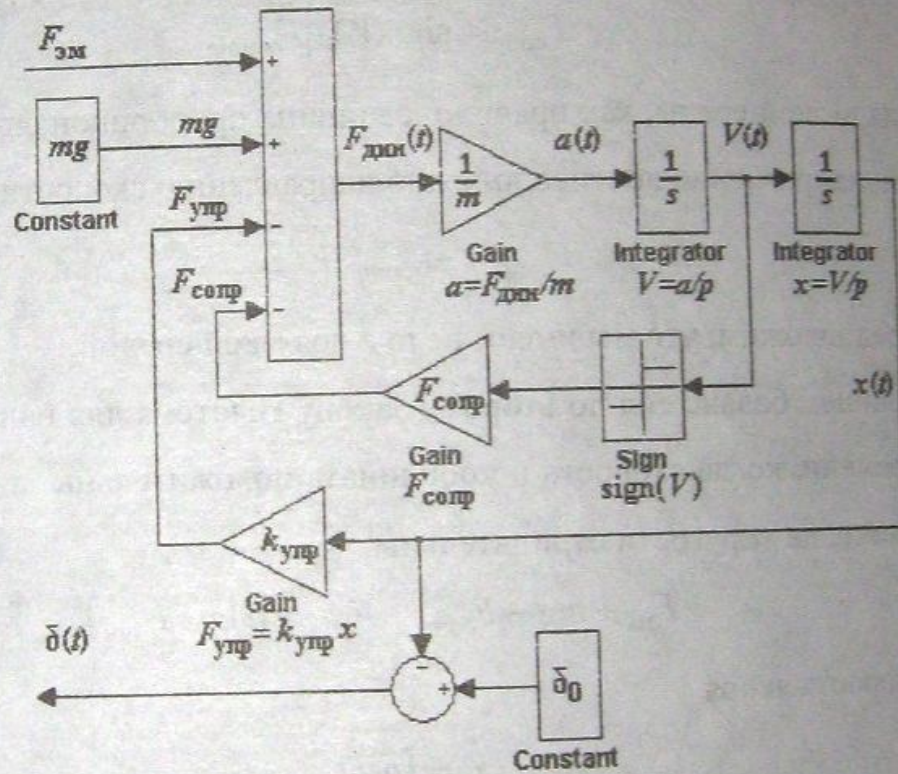


Рис. 8.8. Структурная схема механической части электромагнита

Уравнение, составленное по второму закону Ньютона (8.19), реализовано с помощью сумматора, выходным сигналом с которого является динамическое усилие. Структурная схема механической части связана со структурными схемами магнитной и электрической цепей посредством выходного сигнала – величины воздушного зазора и входного сигнала –

электромагнитного усилия.

Магнитная часть структурной схемы является связующим звеном между механической и электрической частями устройства и описывается следующими уравнениями.

Магнитная индукция в зазоре вычисляется по закону полного тока

$$iw = H_c l_c + 2H_\delta \delta. \quad (8.24)$$

При большой величине воздушного зазора и при незначительном его уменьшении $H_c l_c \ll 2H_\delta \delta$, поэтому слагаемым $H_c l_c$ можно пренебречь. В этом случае уравнение (8.24) приобретает вид

$$iw = 2H_\delta \delta, \quad (8.25)$$

откуда для воздушного зазора

$$B = \mu_0 H_\delta = \frac{iw\mu_0}{2\delta}. \quad (8.26)$$

Усилие притяжения якоря (электромагнитное усилие)

$$F = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S}. \quad (8.27)$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{w^2}{R_{M\delta}} = \frac{w^2 \mu_0 S}{\delta}. \quad (8.28)$$

Согласно уравнениям (8.25) – (8.28) строится магнитная часть структурной схемы (рис. 8.9).

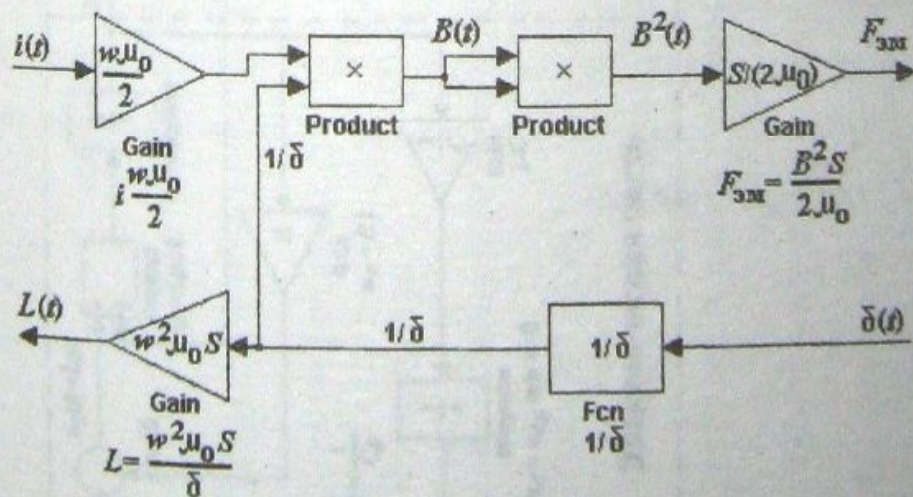


Рис. 8.9. Магнитная часть структурной схемы электромагнита

Структурная схема электромагнита показана на рис. 8.10.

Электрическая энергия, запасаемая конденсатором,

$$W_c = \frac{Cu_c^2}{2}. \quad (8.29)$$

Магнитная энергия, запасаемая индуктивностью электромагнита,

$$W_L = \frac{Li^2}{2}. \quad (8.30)$$

Потенциальная энергия, запасаемая пружиной,

$$W_{\text{пр}} = \frac{c_{\text{пр}}x^2}{2}. \quad (8.31)$$

Энергия, затрачиваемая на преодоление силы сопротивления,

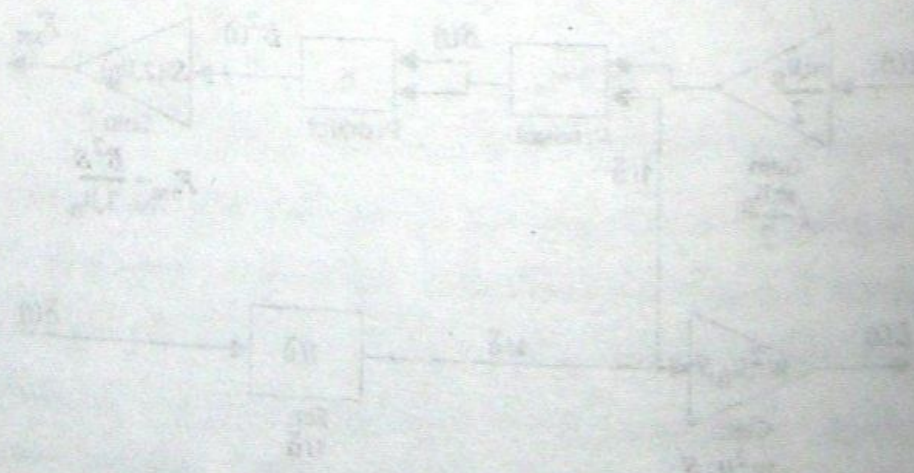
$$W_{\text{сопр}} = F_{\text{сопр}}x. \quad (8.32)$$

Кинетическая энергия движения подвижной массы

$$W_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (8.33)$$

Тепловая энергия, теряемая в R ,

$$W_R = \int_0^t Ri_{(t)}^2 dt. \quad (8.34)$$



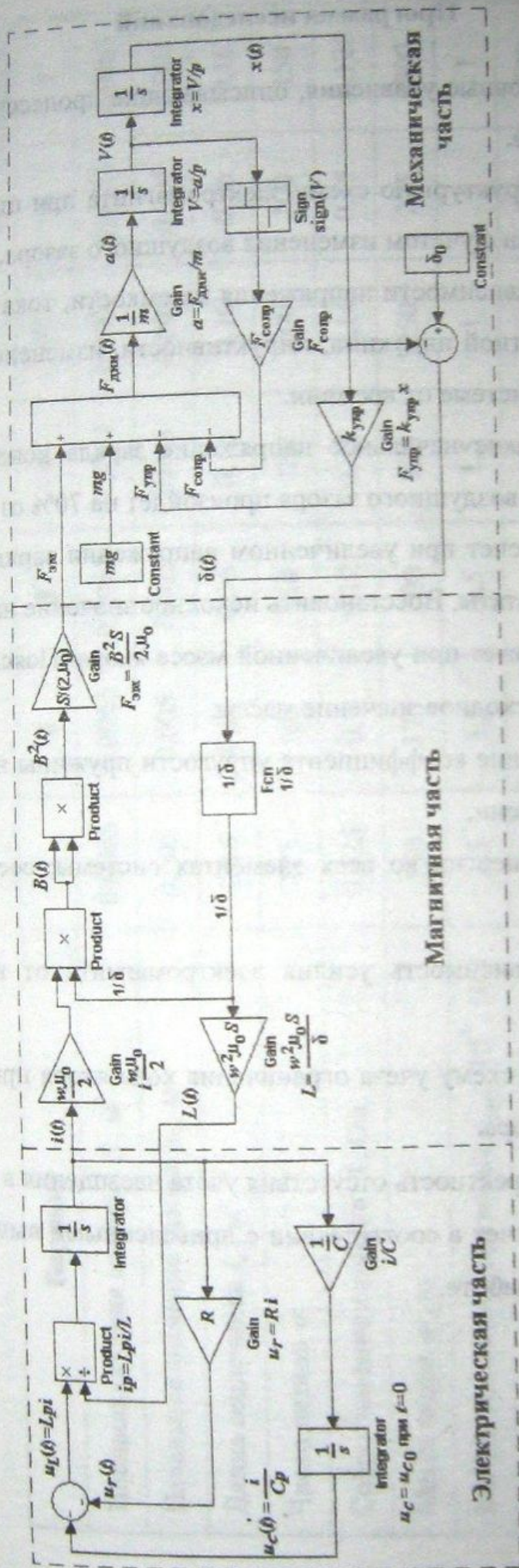


Рис. 8.10. Полная структурная схема электромагнита

Программа исследований

1. Записать основные уравнения, описывающие процессы в электро-механической системе.
2. Построить структурную схему электромагнита при питании от конденсаторной батареи с учетом изменения воздушного зазора.
3. Рассчитать зависимости напряжения на емкости, тока катушки, скорости якоря, магнитной индукции, индуктивности, изменения воздушного зазора и усилий в системе от времени.
4. Подобрать такое начальное напряжение заряда конденсатора, при котором выработка воздушного зазора произойдет на 70% от начального.
5. Повторить расчет при увеличенном напряжении заряда конденсатора. Пояснить результаты. Восстановить исходное значение напряжения.
6. Повторить расчет при увеличенной массе якоря. Пояснить результаты. Восстановить исходное значение массы.
7. Оценить влияние коэффициента упругости пружины на зависимость координаты от времени.
8. Определить энергии во всех элементах системы, составить баланс энергий.
9. Построить зависимость усилия электромагнита от величины воздушного зазора.
10. Предложить схему учета ограничения хода якоря при выработке воздушного зазора.
11. Оценить корректность отсутствия учета насыщения в схеме.
12. Оформить отчет в соответствии с приведенными выше пунктами и сделать выводы по работе.

Таблица 8.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Площадь сечения стержня S , м^2	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063
Начальное значение зазора δ_0 , м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Длина сердечника l_c , м	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Число витков w	123	100	150	180	200	100	150
Сопротивление катушки R , Ом	0,125	0,1	0,12	0,13	0,14	0,15	0,125
Масса якоря m , кг	150	175	200	225	250	275	300
Кэфф. жесткости пружины $\kappa_{\text{упр}} \cdot 10^7$, Н/м	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1
Напряжение заряда конденсатора $U_{c, \text{нат}}$, В	520	400	380	350	320	300	520
Емкость конденсатора C , мкФ	1600	1500	1400	1300	1600	1500	1400
Сила сопротивления $F_{\text{сопр}}$, Н	300	300	300	300	300	300	300

Таблица 8.6

Вариант	8	9	10	11	12	13	14
Площадь сечения стержня S , м^2	0,005	0,005	0,006	0,006	0,0055	0,0065	0,006
Начальное значение зазора δ_0 , м	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Длина сердечника l_c , м	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Число витков w	143	120	130	135	140	115	150
Сопротивление катушки R , Ом	0,135	0,15	0,12	0,145	0,13	0,13	0,125
Масса якоря m , кг	155	165	220	325	150	175	200
Кoeff. жесткости пружины $\kappa_{\text{упр}} \cdot 10^7$, Н/м	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1
Напряжение заряда конденсатора $U_{c, \text{нат}}$, В	520	400	380	750	620	700	720
Емкость конденсатора C , мкФ	2000	2500	2400	1800	1900	1800	1400
Сила сопротивления $F_{\text{сопр}}$, Н	300	300	300	300	300	300	300

Описание и расположение блоков, используемых в лабораторной работе (для версии Simulink в MatLab 6.5)

Библиотека Sources (Источники сигналов):

- Элемент Constant (Источник постоянного сигнала). Свойство – величина сигнала.

Библиотека Sinks (Регистраторы – элементы отображения сигналов):

- Элемент Scope (Осциллограф). Предназначен для построения временных диаграмм. Имеет функцию автомасштабирования.
- Элемент XY-Graph (Графопостроитель). Предназначен для построения фазовых характеристик – зависимости одной переменной от другой. Не имеет функции автомасштабирования.

Библиотека Continuous:

- Элемент Integrator (Блок интегрирования). Производит интегрирование входного сигнала. В окне свойств блока может быть задано начальное условие (Initial condition) – величина выходного сигнала в начальный момент времени.

Библиотека Math Operations (Блоки математических функций):

- Элемент Sum (Сумматор). Производит суммирование/вычитание двух и более сигналов. Свойства – форма блока, количество (знаки) входных сигналов.
- Элемент Product (Произведение). Предназначен для умножения/деления двух и более сигналов. Свойство – количество (знаки) входных сигналов с учетом операции.
- Элемент Gain (Усилитель). Производит умножение входного сигнала на постоянный коэффициент, задаваемый в свойствах блока.
- Элемент Sign (Знак сигнала). Выходной сигнал равен 1, 0, -1, что соответствует положительному, нулевому или отрицательному входному сигналу соответственно.