

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТРАНСФОРМАТОРА (РЕЗОЛЬВЕРА)

**Цель лабораторной работы:** изучение свойств синусно-косинусных вращающихся трансформаторов (резольверов) и датчиков положения на их основе в результате исследования их компьютерных моделей.

#### Требования к оформлению результатов лабораторной работы

Результаты всех этапов исследования должны быть отражены в отчёте. В отчёт вносятся постановка решаемой задачи, структурная схема и значения параметров модели, осциллограммы, результаты их анализа и выводы.

Отчёт выполняется на листах формата А4, должен иметь титульный лист и оглавление. Все страницы должны быть пронумерованы (титульный лист имеет номер 1, но на титульном листе номер не ставится).

#### Теоретическая часть

*Резольвер* – это четырехобмоточная двух – и более полюсная электрическая машина с индукционным взаимодействием роторных и статорных обмоток, предназначенная для преобразования механического перемещения угла поворота ротора в электрический сигнал – выходное напряжение, амплитуда которого зависит от угла поворота. Исходя из принципа действия резольвера, его можно называть вращающимся трансформатором (ВТ).

В зависимости от выходного сигнала различают следующие типы резольверов:

- синусно – косинусные (СКВТ);
- линейные (ЛВТ);
- резольверы – построители;
- фазовращатели (ФВ);
- масштабные ВТ (МВТ).

*Для получения резольвера различных типов (СКВТ, ЛВТ и т.д.) используют одну и ту же электрическую машину с двумя обмотками на статоре и двумя обмотками на роторе при различных способах их включения.*

## 1. Конструкция резольвера

Конструктивно резольвер представляет собой асинхронную электрическую машину с фазным ротором (контактные резольверы), но бывают и бесконтактные (с кольцевым трансформатором). Устройство резольвера упрощенно представлено на рис. 1 и 2.

Магнитопровод статора и ротора собирается из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. В пазах магнитопровода статора и ротора размещаются по две обмотки. Две статорные обмотки пространственно сдвинуты на  $90^\circ$  между собой, так же как и роторные. Обмотки статора и ротора стараются выполнять одинаковыми (число витков, сечения проводов). Одна статорная обмотка называется *обмоткой возбуждения (главной)*, другая – *компенсационной (квадратурной)*. Две роторные обмотки называются соответственно *косинусной* и *синусной*.

Выводы статорных обмоток выведены к соединительным панелям, а выводы роторных обмоток, с которых снимается выходной сигнал, на токосъемное устройство: четыре кольца, вращающиеся вместе с ротором, которые в свою очередь находятся в электрическом скользящем контакте с неподвижными щетками. В бесконтактных резольверах напряжение с обмоток ротора можно снимать с помощью кольцевых трансформаторов.

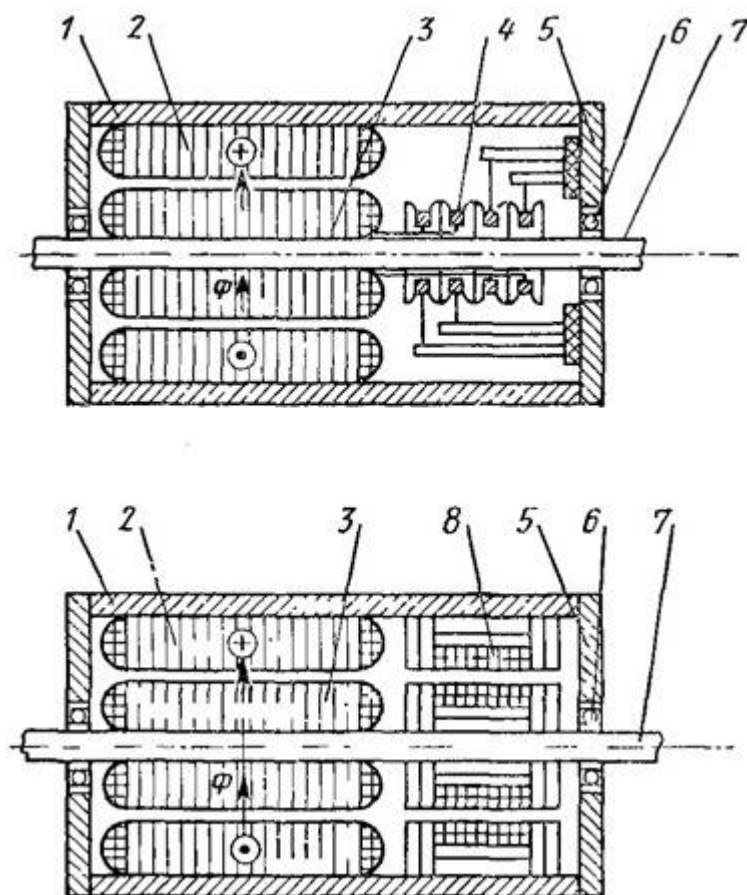


Рис. 1. Упрощенный продольный разрез контактного и бесконтактного ВТ:  
1 – статор, 2 – статорная обмотка, 3 – роторная обмотка, 4 – токосъемные кольца, 5 – крышки, 6 – подшипники, 7 – вал, 8 – кольцевой трансформатор.

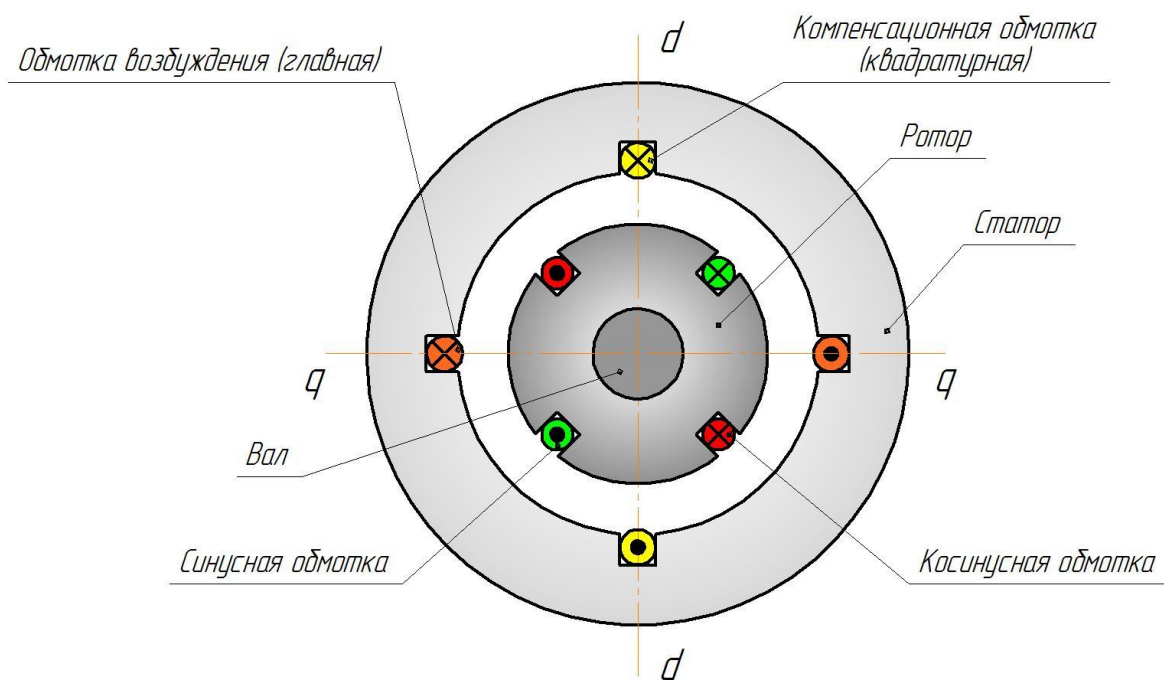


Рис. 2. Упрощенный поперечный разрез ВТ

## 2. Принцип действия резольвера

Как уже было сказано, действия резольвера основаны на принципе работы трансформатора (рис. 2). Рассмотрим принцип работы повышающего трансформатора с сердечником квадратного сечения, к которому с одной стороны намотана первичная обмотка, подключенная к источнику синусоидального напряжения  $U_1$ , а с другой стороны - вторичная обмотка, подключенная к нагрузке  $r_H$ .

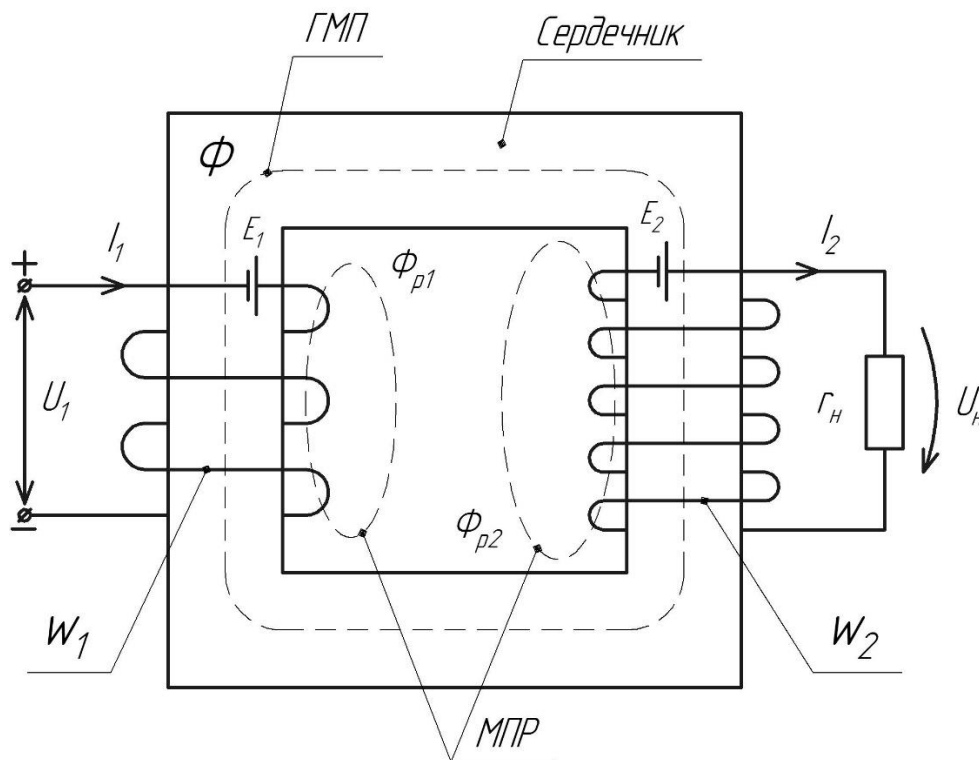


Рис. 3. Конструкция трансформатора

При подключении первичной обмотки к сети синусоидального напряжения  $U_1$  с круговой частотой сети  $\omega$ , по ней потечет переменный ток  $I_1$ .

$$U_1 = U_{1m} \sin \omega t$$

Этот переменный ток  $I_1$  создаст вокруг себя переменное магнитное поле (МП). Первичной количественной характеристикой любого МП является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , который характеризует величину и направление силы МП. Чтобы как-то изобразить МП, вводится понятие магнитных линий, которые рисуются так, чтобы вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  был направлен по касательной к ним.

Скалярной характеристикой магнитного поля является магнитный поток  $\Phi_B$  вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ . Магнитный поток  $\Phi_B$  представляет собой двойной интеграл вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  по поверхности площадью  $S$ , то есть:

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = \iint_S B_n dS$$

где  $B_n$  – проекция вектора  $\vec{B}$  на нормаль  $\vec{n}$  к элементарной площадке  $dS$ ;

$d\vec{S}$  – вектор, модуль которого равен  $dS$ , а направление совпадает с направлением вектора внешней нормали  $\vec{n}$  к элементарной площадке  $dS$ .

Магнитные линии МП изображаются ещё и таким образом, чтобы их количество было равно величине магнитного потока  $\Phi_B$  через рассматриваемую поверхность.

Итак, большая часть магнитных линий переменного МП, создаваемого переменным током  $I_1$ , замыкается через сердечник, а небольшая часть замыкается вокруг витков первичной обмотки через воздух. Таким образом исходное переменное МП, создаваемое переменным током  $I_1$ , разделяется на главное магнитное поле (ГМП) и магнитное поле рассеяния (МПР) соответственно. Поток вектора магнитной индукции ГМП через поперечную площадь сердечника называется *главным магнитным потоком*  $\Phi$ .

**Закон электромагнитной индукции Фарадея:** при изменении магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего электрический контур, в нём возбуждается ток, называемый индукционным. Величина электродвижущей силы, ответственной за этот индукционный ток, определяется соотношением:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

где  $L$  – индуктивность (коэффициент пропорциональности между током и его магнитным потоком).

Магнитные линии ГМП пересекают площади, ограниченные витками первичной обмотки, следовательно, в них будет образовываться ЭДС  $E_1$ , называемой *ЭДС самоиндукции*.

Магнитные линии МПР будут замыкаться вокруг витков первичной обмотки через воздух. В таком случае МПР можно характеризовать магнитным *поток*ом рассеяния  $\Phi_{p1}$  и соответствующей ему ЭДС рассеяния  $E_{p1}$ :

$$E_{p1} = -w_1 \frac{d\Phi_{p1}}{dt} = -L_{p1} \frac{dI_1}{dt}$$

$$E_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1 L_1 \frac{dI_1}{dt}$$

где  $w_1$  – количество витков первичной обмотки;

$L_1$  – индуктивность первичной обмотки;

$L_{p1}$  – индуктивность рассеивания первичной обмотки.

Тогда для первичной обмотки по второму закону Кирхгофа справедливо выражение:

$$I_1 r_1 - U_1 - E_1 - E_{p1} = 0$$

где  $r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки;

Магнитные линии ГМП также пересекают витки вторичной обмотки, следовательно в них наводится ЭДС  $E_2$ . Если вторичную обмотку замкнуть на сопротивление нагрузки  $r_n$ , по ней потечет ток  $I_2$ . Аналогично первичной обмотке часть магнитного потока, создаваемого током  $I_2$ , будет рассеиваться, что также можно характеризовать потоком рассеяния  $\Phi_{p2}$ , который будет наводить ЭДС рассеяния  $E_{p2}$ :

$$E_{p2} = -w_2 \frac{d\Phi_{p2}}{dt} = -L_{p2} \frac{dI_2}{dt}$$

$$E_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -w_2 L_2 \frac{dI_2}{dt}$$

где  $w_2$  – количество витков вторичной обмотки;

$L_{p2}$  – индуктивность рассеивания вторичной обмотки;

$L_2$  – индуктивность вторичной обмотки.

Тогда для вторичной обмотки аналогично справедливо выражение:

$$I_2 r_2 + I_2 r_n - E_2 - E_{p2} = 0$$

где  $r_2$  – активное сопротивление вторичной обмотки;

Пренебрегая потоком рассеяния в первичной обмотке  $\Phi_{p1}$  и её активным сопротивлением  $r_1$ , можно записать:

$$U_1 \approx -E_1$$

Так как приложенное к первичной обмотке напряжение  $U_1$  синусоидальное, следовательно, при таких допущениях и  $E_1$  будет синусоидальным.

$$E_1(t) = -U_{1m} \sin \omega t = -E_m \sin \omega t = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$d\Phi = \frac{E_m}{w_1} \sin \omega t dt$$

$$\Phi(t) = \frac{E_m}{w_1 \omega} \int \sin \omega t dt = \frac{E_m}{w_1 \omega} (-\cos \omega t) = -\Phi_m \cos \omega t$$

$$\Phi_m = \frac{E_m}{w_1 \omega} = \frac{E_1 \sqrt{2}}{w_1 \cdot 2\pi f}$$

где  $f$  – частота сети, Гц;

$E_1$  – действующее значение синусоидального ЭДС в первичной обмотке (постоянное ЭДС, которое бы производило ту же работу, что и синусоидальное ЭДС за время одного периода).

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_1 f_1 \Phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_1 f B_m S$$

$$\boxed{E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m}$$

Аналогично для вторичной обмотки:

$$\boxed{E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m}$$

Выходной сигнал  $E_2$  с вторичной обмотки трансформатора, помимо вышеуказанного, будет зависеть также и от *относительного пространственного положения вторичной обмотки относительно первичной*. **Это явление является ключевым в принципе работы резольвера и любой вращающейся электрической машины.**

Применительно к резольверу в качестве первичной обмотки выступает обмотка возбуждения  $B$ , а в качестве вторичных обмоток выступает синусная и косинусная обмотки ротора. Распределение магнитных линий МП, создаваемого током возбуждения  $I_b$ , главного магнитного потока  $\Phi$  (потока возбуждения) и потоков рассеяния  $\Phi_p$  показано на рис. 3.



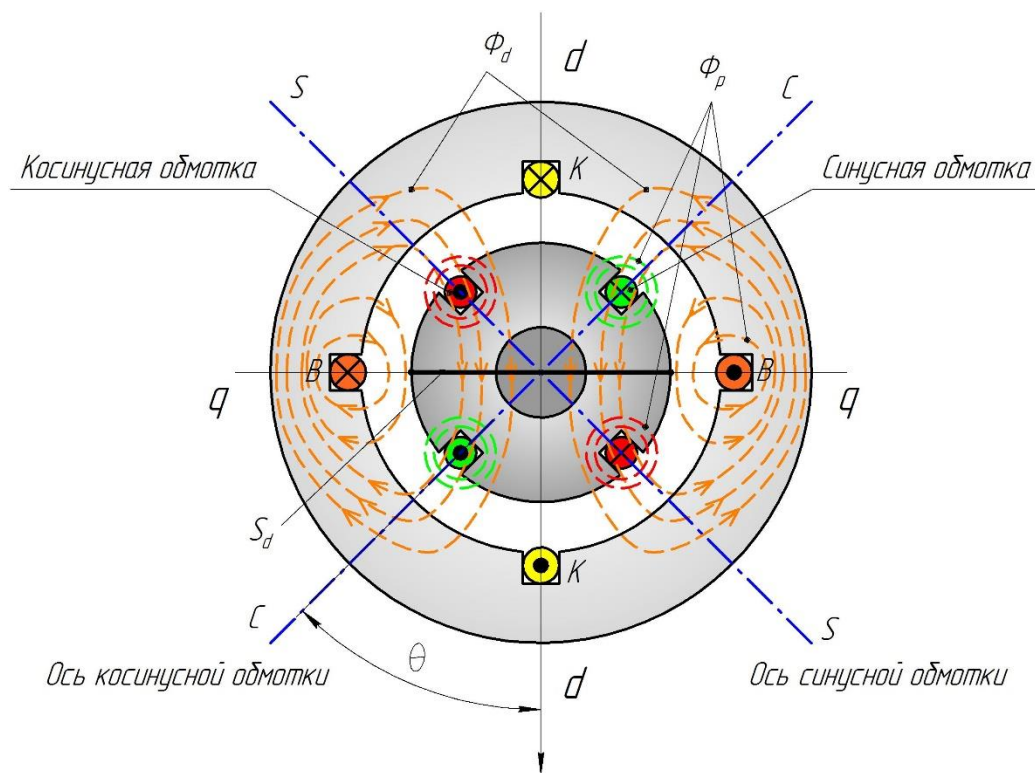


Рис. 3. Магнитные потоки в резольвере

Рассмотрим работу резольвера на **холостом ходу** (обе роторные обмотки разомкнуты).

Соответствующая этому случаю схема резольвера представлена на рис. 4

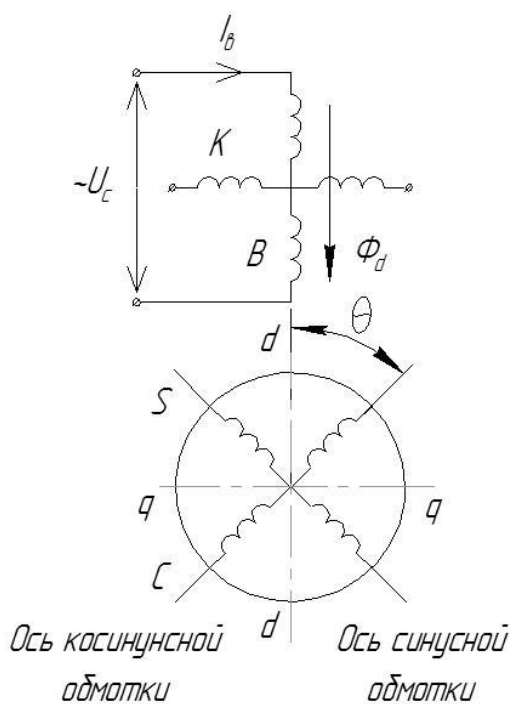


Рис. 4. Схема резольвера на холостом ходу



При подключении обмотки возбуждения  $B$  к сети переменного напряжения  $\sim U_c$  по ней потечет переменный ток возбуждения  $I_B$ , который создаст переменное МП, магнитные линии которого показаны оранжевым (рис. 3). Данное МП также разделим на ГМП и МПР. Магнитные линии ГМП пересекают магнитопровод ротора, в отличие от магнитных линий МПР, которые замыкаются через воздушных зазор между статором и ротором. ГМП создаст магнитный поток через площадь  $S_d$  поперечного сечения  $(q-q)$  ротора. Этот поток называется *продольным магнитным потоком*  $\Phi_d$ . Продольный магнитный поток  $\Phi_d$  является переменным и поэтому индуцирует переменное ЭДС возбуждения  $E_B$  (ЭДС самоиндукции) подобно первичной обмотке в обычном трансформаторе.

$$E_B = 4,44k_1w_1f\Phi_{dm}$$

где  $k_1$  – обмоточный коэффициент статорной обмотки. Обычно  $k_1 \approx 0,9$ .

Предположим, что ось обмотки  $C$  ротора сдвинута относительно оси обмотки  $B$  статора на некоторый угол  $\theta$ . В таком случае, вектор магнитной индукции  $\bar{B}_d$  ГМП в каждой точке плоскости, ограниченной контуром витка косинусной обмотки, будет пересекать эту плоскость под тем же углом  $\theta$  (рис. 5). Тогда магнитный поток  $\Phi_c$  вектора  $\bar{B}_d$  через площадь  $S_c$ , ограниченную витками косинусной обмотки равен:

$$\Phi_c = \iint_{S_c} \bar{B}_d d\bar{S}_c = \iint_{S_d} \underbrace{\bar{B}_d d\bar{S}_d}_{\Phi_d} \cos \theta = \Phi_d \cos \theta$$

Если говорить об амплитудах магнитных потоков, то максимальное значение потока  $\Phi_d$ , сцепленного с обмоткой  $C$  будет равняться.

$$\Phi_{cm} = \Phi_{dm} \cos \theta$$

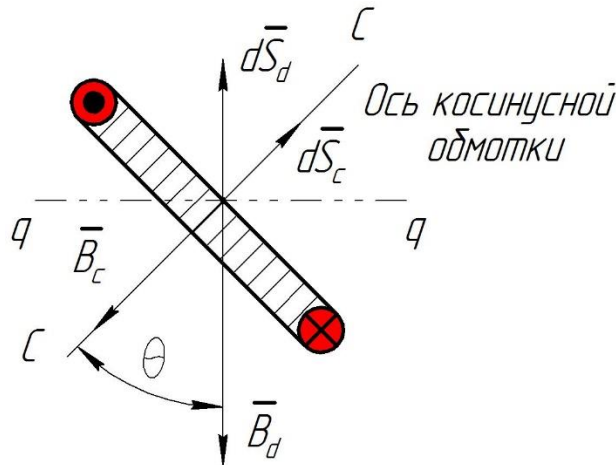


Рис. 5. Магнитный поток через площадь косинусной обмотки

Тогда ЭДС в косинусной обмотке при холостом ходе  $E_{c0}$  будет равняться:

$$E_{c0} = 4,44k_2w_2f\Phi_{cm} = 4,44k_2w_2f\Phi_{dm} \cos \theta$$

где  $k_2$  – обмоточный коэффициент роторной обмотки.

Соотнеся ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения  $E_B$  и ЭДС косинусной обмотки  $E_{c0}$ , получим выходное напряжение косинусной обмотки при холостом ходе:

$$\frac{E_{c0}}{E_B} = \frac{k_2w_2}{\underbrace{k_1w_1}_k} \cos \theta = k \cos \theta$$

$$\boxed{E_{c0} = kE_B \cos \theta}$$

где  $k$  – коэффициент трансформации резольвера.

Обмотка  $S$  ротора сдвинута относительно обмотки  $C$  на угол  $\pi/2$ , следовательно, выходное напряжение на этой обмотке будет равняться:

$$E_{s0} = 4,44w_2k_2\Phi_{dm} \cos(\theta - \pi/2) = kE_B \cos(\theta - \pi/2) = kE_B \sin \theta$$

Таким образом, в обмотках ротора при холостом ходе индуцируются ЭДС, пропорциональные синусу или косинусу угла поворота ротора относительно соответствующего потока.

## Практическая часть

### 1. Ознакомление с элементами компьютерного моделирования в среде Matlab/Simulink

1.1. Соберите компьютерную модель системы (рис.1.1), состоящей из источника постоянного сигнала, интегратора и осциллографа. Если входной сигнал интегратора равен 1, то выходной сигнал интегратора можно интерпретировать как время. Рассмотрите осциллограмму выходного сигнала.

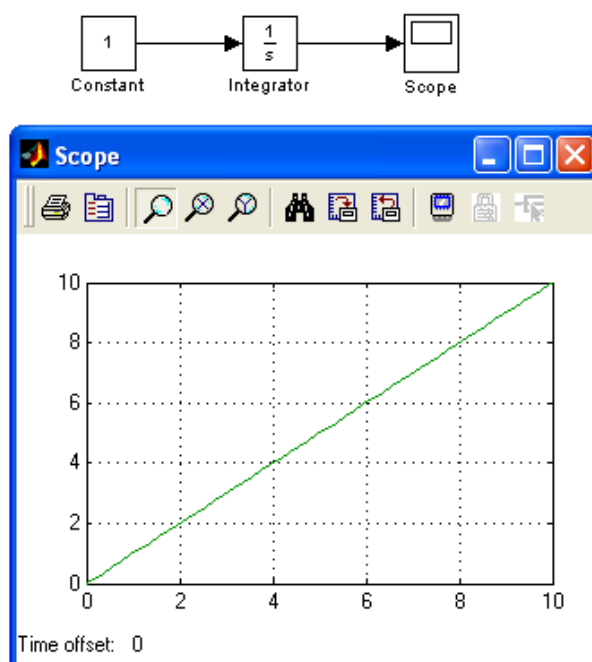


Рис. 1.1

1.2. Добавьте в систему блок математического преобразования (рис.1.2) и настройте его так, чтобы он выполнял вычисление синуса сигнала, подаваемого на вход этого блока. Наблюдая выходной сигнал на осциллографе, объясните результат.

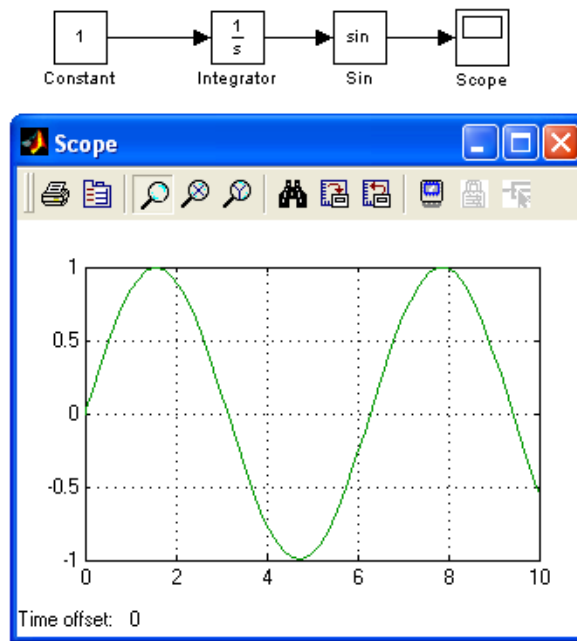


Рис. 1.2

1.3. Сформируйте модель, структура которой изображена на [рис.1.3](#). В неё добавлены элементы, позволяющие задавать желаемое значение круговой частоты колебаний ( $\Omega$ ).

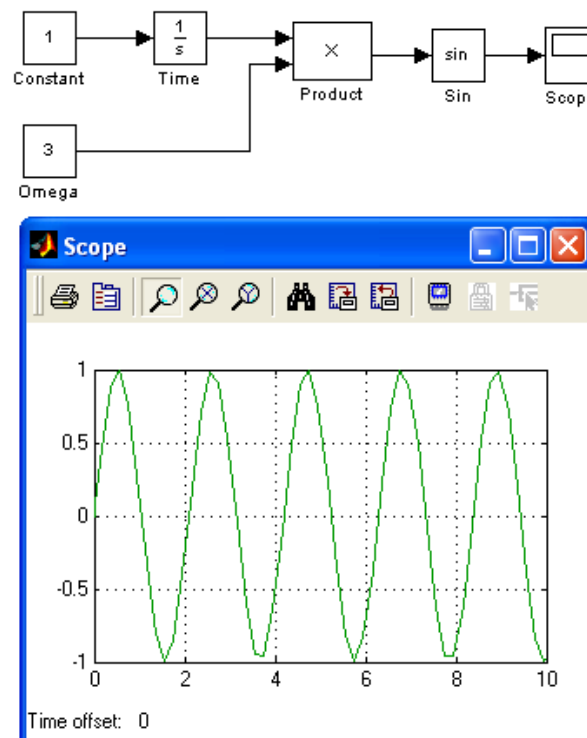


Рис. 1.3

1.4. Установите круговую частоту изменения выходного сигнала, равную 1 рад/с. Зафиксируйте результат. Затем установите значение круговой частоты колебаний, соответствующее частоте 10 кГц. Наблюдая выходной сигнал на осциллографе, объясните результат.

**Примечание.** Для повышения точности формирования гармонического сигнала добавьте в модель апериодическое звено, на выход которого включается терминатор (рис.1.4). Будем считать это апериодическое звено вспомогательным. Его постоянная времени должна быть в несколько раз меньше периода колебаний. Это заставит Simulink выбирать меньшие значения шагов интегрирования, что увеличит точность вычислений. Но при этом возрастает время моделирования.

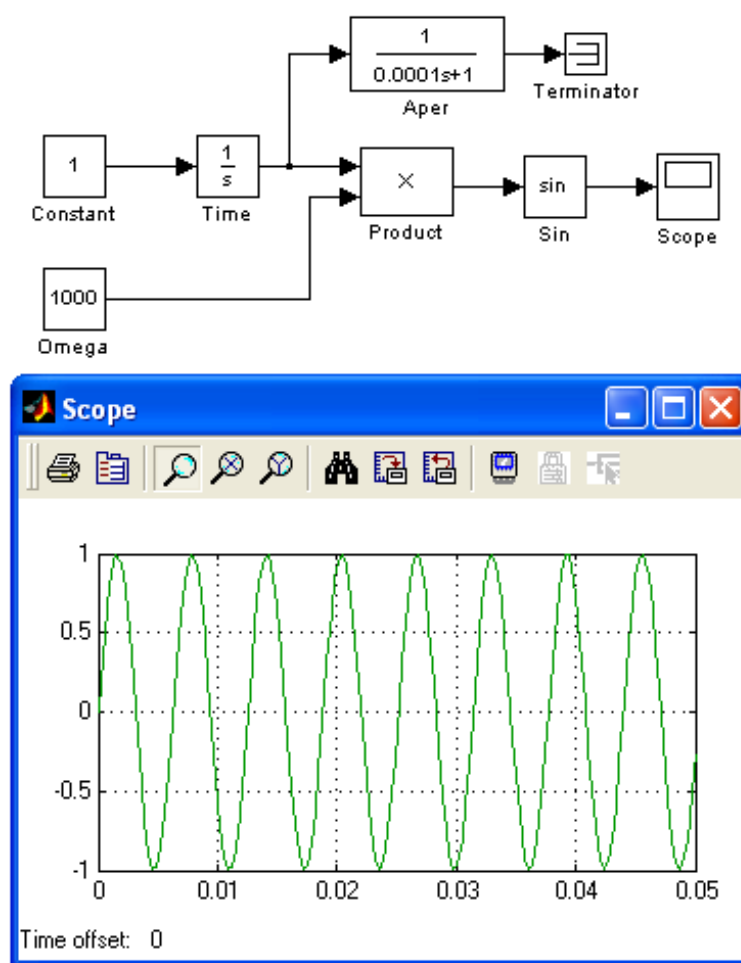


Рис. 1.4

1.5. Подберите наиболее удачное значение постоянной времени вспомогательного апериодического звена, исходя из компромисса между точностью и длительностью моделирования синусоидального сигнала. Зафиксируйте результаты.

## 2. Построение и исследование компьютерной модели резольвера

2.1. Соберите компьютерную модель резольвера, структура которой показана на [рис. 2.1](#). Внутренняя структура используемой в ней подсистемы имеет вид, изображённый на [рис. 2.2](#).

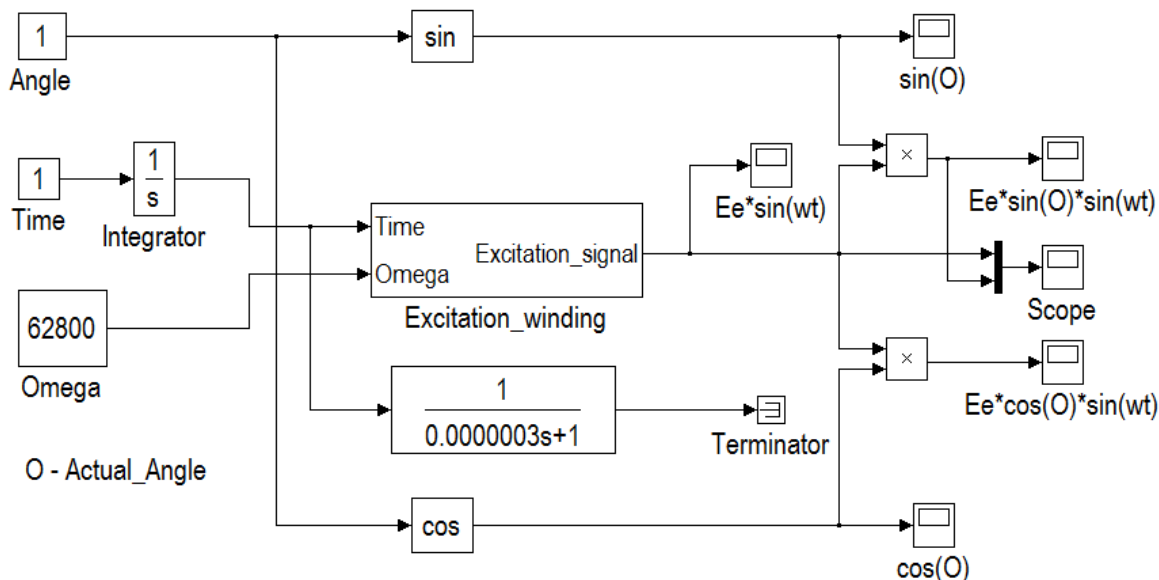


Рис. 2.1. Функциональная схема резольвера с постоянным углом

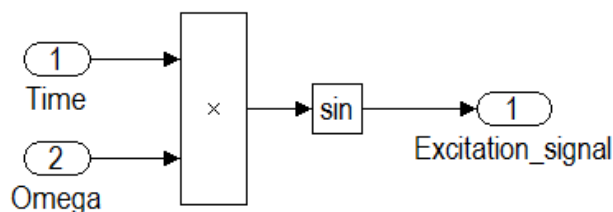


Рис. 2.2. Подсистема обмотки возбуждения

2.2. Задайте значение параметра Omega, соответствующее частоте сигнала возбуждения, равной 10 кГц. Подберите значение постоянной времени вспомогательного апериодического звена. С помощью осциллографов рассмотрите и сравните выходные сигналы резольвера при фиксированных значениях угла поворота ротора относительно статора, равных 0; 1; 2 и 3 рад. Объясните результаты.

2.3. При том же значении частоты сигнала возбуждения проведите исследование работы резольвера для случая, когда угол поворота ротора относительно статора меняется с постоянной скоростью, равной 300 рад/с ([рис.2.3](#)). Для этого задайте необходимое значение параметра Angular\_Velocity. Объясните результаты, обратив внимание на амплитудную модуляцию несущего сигнала сигналом, зависящим от угла поворота ротора.

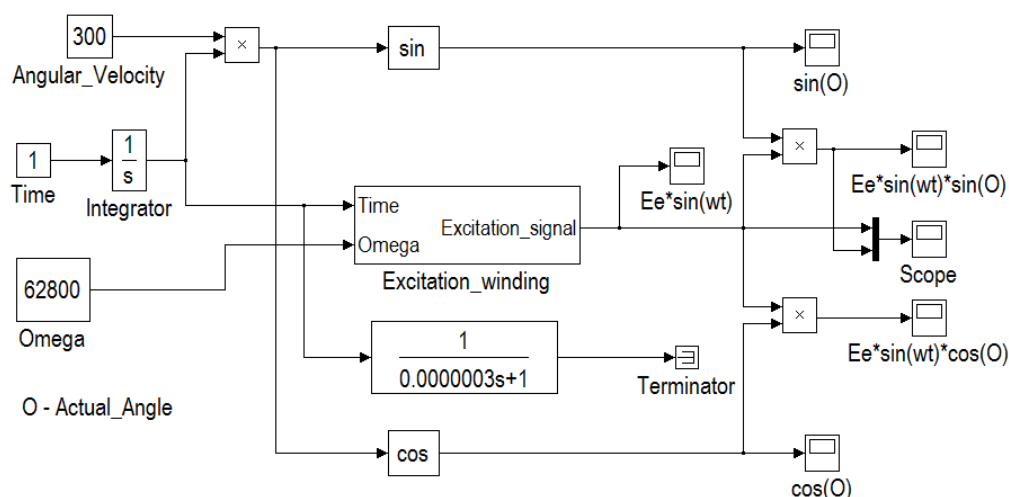


Рис. 2.3. Функциональная схема резольвера с линейно изменяющимся углом

2.4. Повторите вычислительные эксперименты, указанные в п.2.2 и 2.3, задав частоту сигнала возбуждения, равную 10 кГц. Какие изменения обнаружены и в чём их причина?

2.5. Дополните модель резольвера моделью фазочувствительного выпрямителя (Phase\_Sensitive\_Rectifire) (ФЧВ), подключённого к выходу синусной обмотки (рис.2.4). Рассмотрите процесс изменения выходного сигнала ФЧВ при значениях постоянной времени фильтра 0,5; 1; 2мс. При этом задайте частоту сигнала возбуждения 10 кГц и скорость изменения угла поворота ротора относительно статора 300 рад/с.

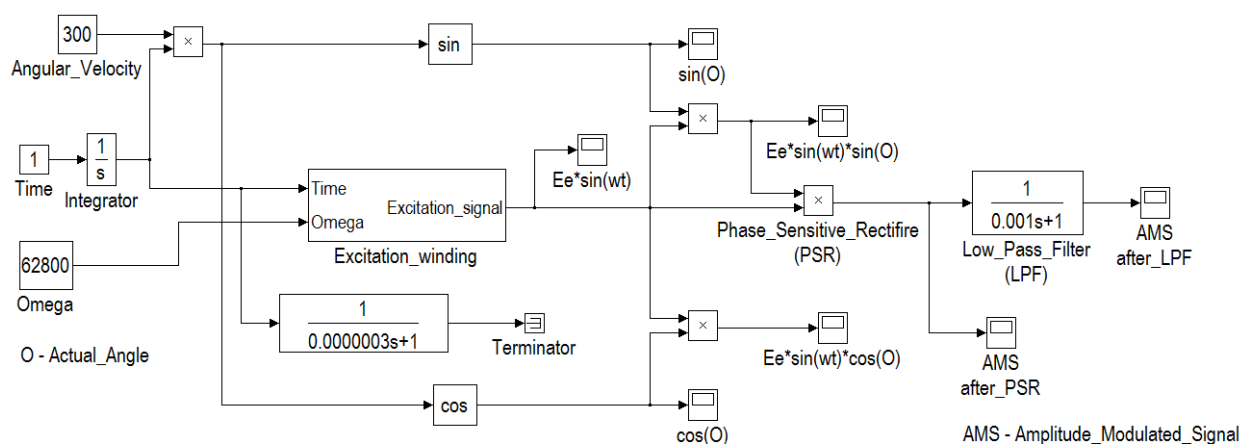


Рис. 2.4. Функциональная схема резольвера с ФЧВ

Сравните графики процессов изменения выходного сигнала синусной обмотки резольвера и выходного сигнала ФЧВ. Зафиксируйте и объясните результаты.



### 3. Исследование динамических свойств компьютерной модели следящей системы, лежащей в основе построения датчика на базе резольвера

3.1. Сформируйте модель охваченной единичной отрицательной обратной связью следящей системы, состоящей из усилителя, апериодического звена и интегратора (рис.3.1).

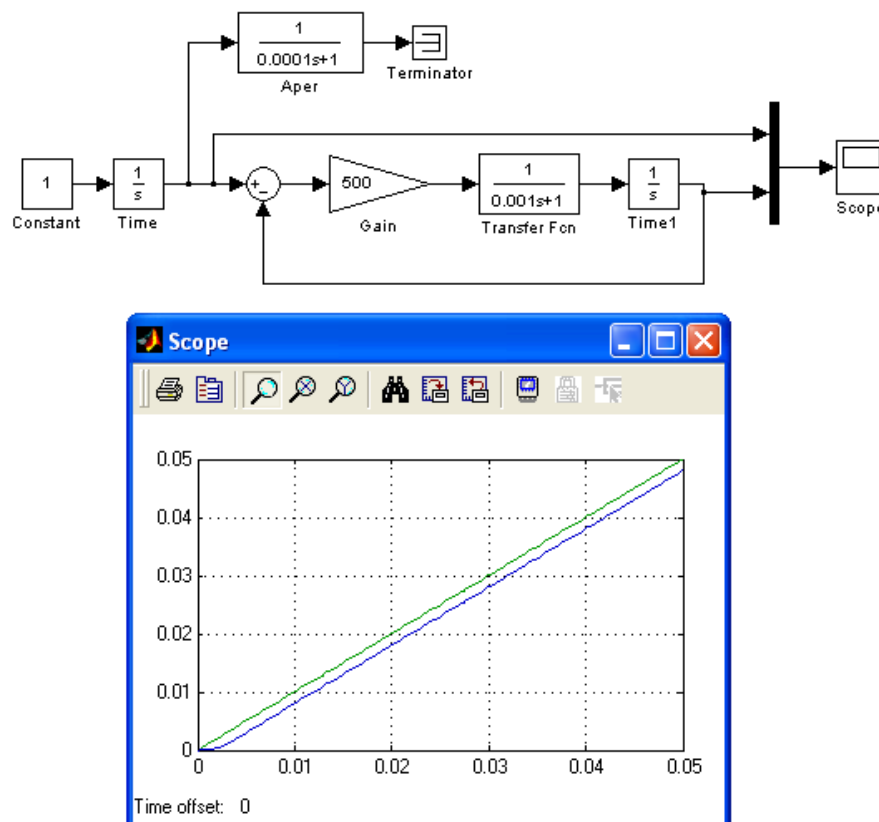


Рис. 3.1

3.2. Задайте постоянное задающее воздействие и исследуйте характер переходных процессов этой системы при различных значениях коэффициента усиления и постоянной времени апериодического звена.

Выясните, как влияют эти параметры на длительность переходного процесса и перерегулирование. Подберите значения постоянной времени апериодического звена, при которых длительность переходного процесса минимальна, а перерегулирование не превышает 5% для значений коэффициента усиления 300 и 1500.

3.2. Задайте линейно нарастающее воздействие и исследуйте зависимость скоростной ошибки системы от значения коэффициента усиления при выбранных ранее значениях постоянной времени апериодического звена. Объясните результаты исследования.

#### 4. Исследование датчика положения с резольвером, представляющего собой следующую систему

4.1. Соберите компьютерную модель датчика на основе резольвера, структура которой показана на рис. 4.1. Задайте частоту сигнала возбуждения 10 кГц и постоянную времени фильтра ФЧВ 1мс. Рассмотрите реакцию датчика на ступенчатое изменение угла поворота ротора резольвера относительно его статора, составляющее 0,5; 1; 2 рад. Подберите коэффициент усиления усилителя (Gain), при котором длительность переходного процесса минимальна, а перерегулирование не превышает 5%.

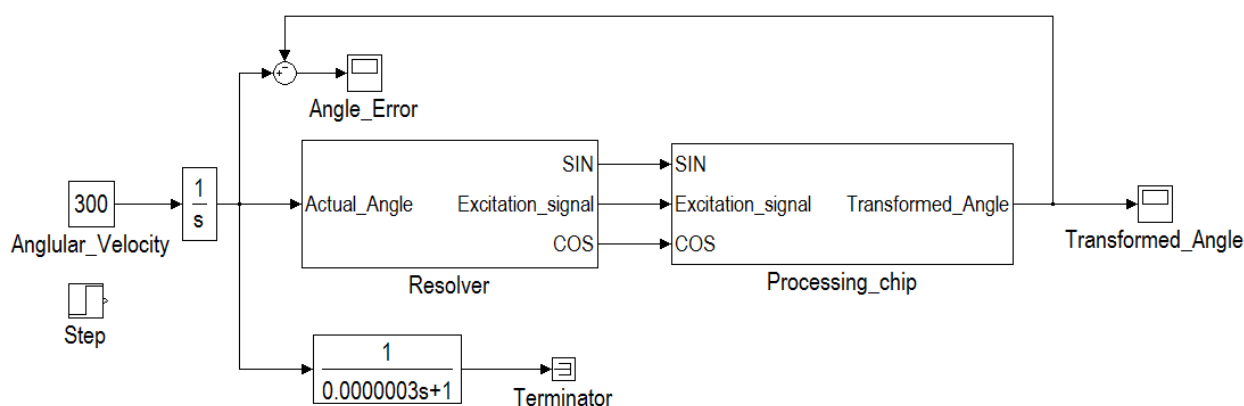


Рис. 4.1. Система обработки угла поворота

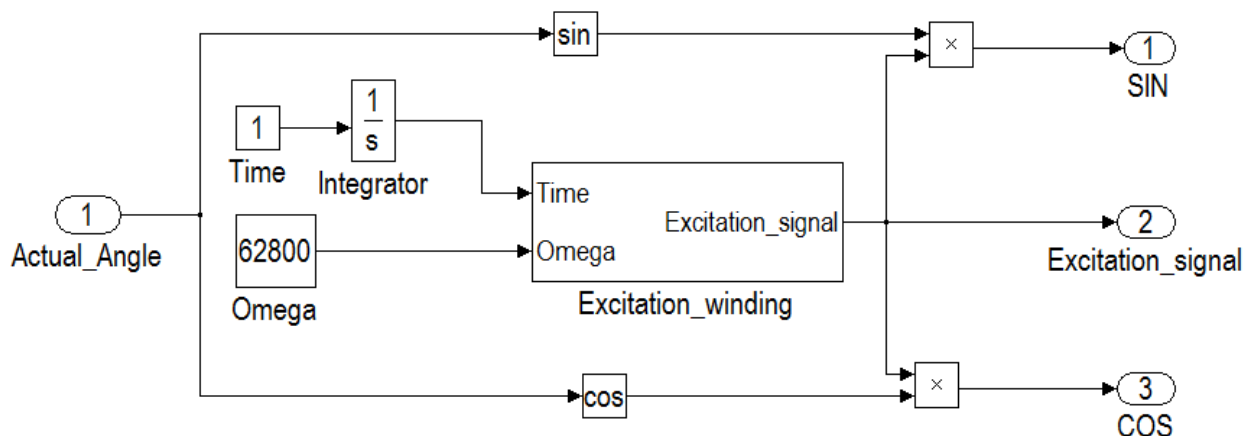


Рис. 4.2. Подсистема Resolver

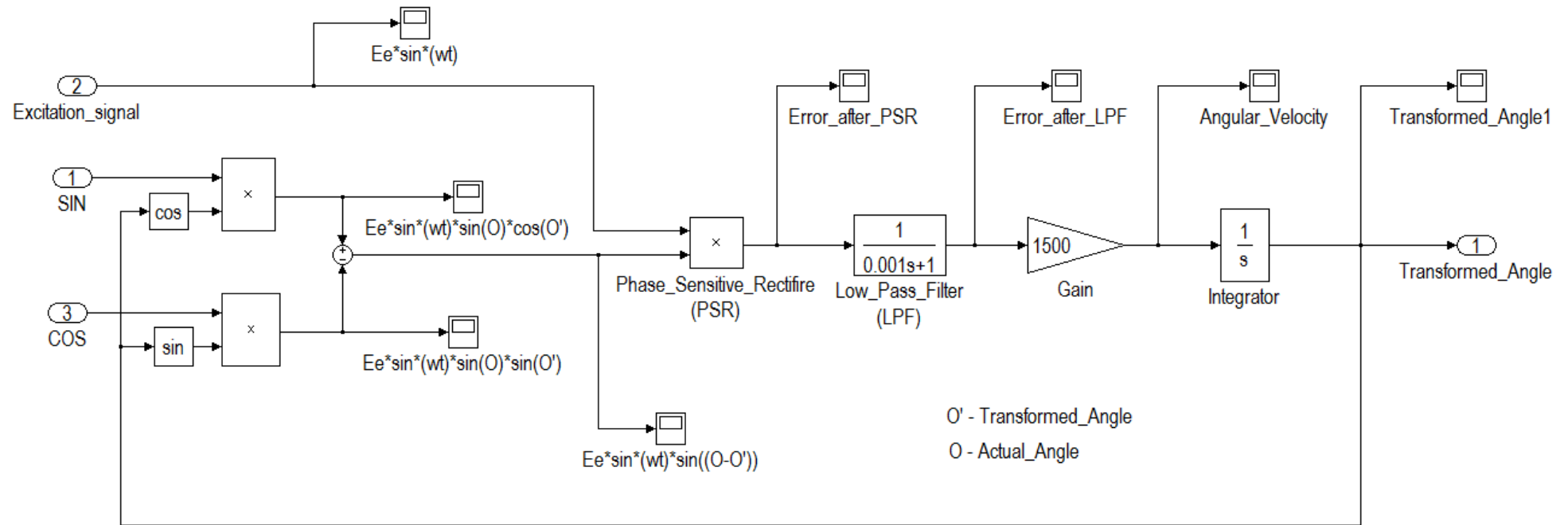


Рис. 4.3. Подсистема Proccesing\_Chip

4.2. Проведите исследование скоростной ошибки датчика при скорости изменения угла поворота ротора резольвера 300 рад/с и при различных значениях *коэффициента усиления* и *постоянных времени* низкочастотного фильтра. Постройте графики зависимости скоростной ошибки от этих параметров. Найдите условия наименьшей скоростной ошибки. Объясните результаты исследования.

4.3. Проведите исследование зависимости амплитуды ошибки датчика от круговой частоты гармонически изменяющегося угла поворота ротора резольвера, изменяя её в диапазоне 1...10 рад/с. При этом задайте коэффициент усиления равным 1500, постоянную времени фильтра ФЧВ – 1мс.

4.4. С целью устранения скоростной ошибки введите в цепь *ПИ-регулятор*. Для этого соберите компьютерную модель системы в соответствии с рис. 4.4.

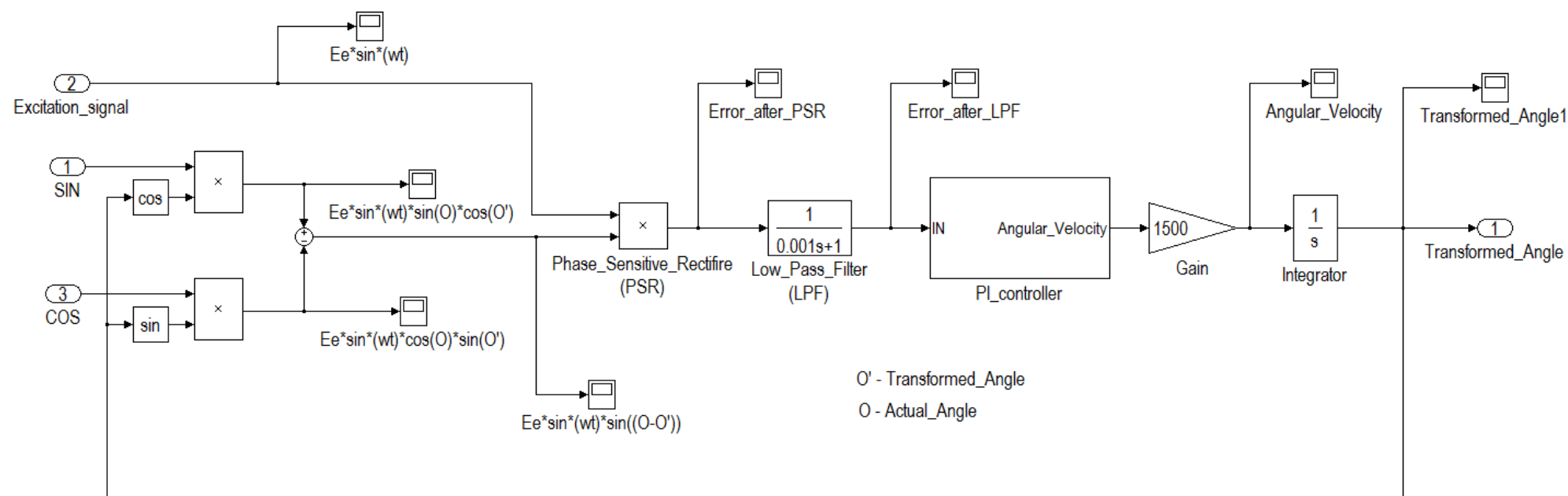


Рис. 4.4. Подсистема Proccesing\_chip с ПИ-регулятором

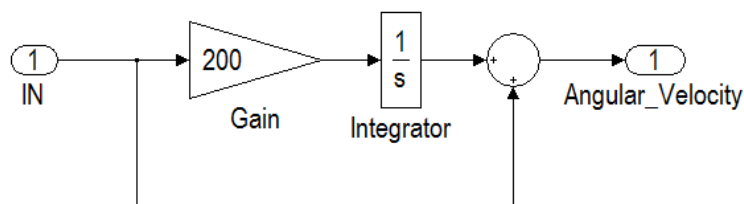


Рис. 4.5. Подсистема PI\_Controller

4.5. Воспользовавшись моделью, представленной на рис. 4.5, подберите значение коэффициента усиления интегральной составляющей ПИ-регулятора, при котором обеспечивается наиболее быстрое затухание переходного процесса.

4.6. Используя модель датчика, соответствующую схеме рис. 4.5, проведите исследования при условиях, указанных в п. 4.2 и 4.3. Зафиксируйте и объясните результаты.

### Вопросы для самопроверки

1. Что такое резольвер, какое количество и каких выходных сигналов он формирует?
2. Что происходит с выходными сигналами резольвера, если его ротор движется по гармоническому закону?
3. Для чего используется фазочувствительный выпрямитель?
4. Из каких соображений выбираются параметры фильтра ФЧВ?
5. Как влияет частота сигнала возбуждения на свойства датчика положения?
6. При каких условиях повышается быстродействие датчика на основе резольвера?
7. Что надо сделать для уменьшения скоростной ошибки датчика?
8. От чего зависит погрешность определения скорости изменения угла поворота ротора относительно статора?
9. Что происходит при увеличении коэффициента усиления в цепи обратной связи датчика положения на основе резольвера?
10. Как влияет постоянная времени фильтра ФЧВ на динамические свойства и точность датчика положения на основе резольвера?
11. Как влияет ПИ-регулятор на свойства датчика на основе резольвера?
12. Как влияют значения параметров ПИ-регулятор на длительность и характер переходного процесса ошибки датчика?