

Стандартные настройки CAP и их применение

Синтез САУ заключается в выборе структуры и параметров системы с целью обеспечения заданных требований к показателям качества процесса управления.

На первом этапе производится анализ системы исходных данных, намечаются пути обеспечения точности и быстродействия при отработке задающего воздействия в условиях влияния различных помех и возмущений, рассчитываются параметры объекта управления, производится выбор и расчет исполнительных элементов и измерительных преобразователей (датчиков положения, датчиков скорости и т.д.) системы.

Система исходных данных формируется в техническом задании на проект и в общем случае включает: параметры объекта управления, в том числе, максимальные значения скорости U_{\max} и ускорения a_{\max} управляемой величины; законы изменения задающего и возмущающего f воздействий; максимально допустимую установившуюся ошибку Δu_{\max} ; время регулирования T_r ; перерегулирование σ ; диапазоны изменения рабочих температур, давлений, влажности; максимально допустимые перегрузки, вибрации и акустические шумы.

При расчете параметров объекта управления необходимо учитывать физические процессы, происходящие в объекте и ограничения при которых можно получить его математическую модель.

Математическая модель объекта управления может быть представлена в виде дифференциальных, интегро-дифференциальных или разностных уравнений. Выбор измерительных преобразователей рекомендуется осуществлять на основании серийно производимых элементов по каталогам и справочникам.

На втором этапе устанавливается общая структурная схема САУ. В связи с общепринятым делением синтезируемая система разделяется на *изменяемую* и *неизменяемую* части. К неизменяемой части относятся исполнительные элементы, объект управления, усилители мощности и датчики информационно-измерительных каналов системы. К изменяемой части относятся элементы, которые вводятся для придания системе требуемого качества – это регуляторы. От того, как включен регулятор зависит общая конфигурация САУ.

На третьем этапе производится синтез регулятора с применением различных инженерных методик. Синтезированный регулятор должен обеспечить требуемые показатели качества и, по возможности, оптимальность переходного процесса. К современным методикам относится синтез регуляторов с применением стандартных настроек: настройка на оптимум по модулю и настройка на симметричный оптимум.

Данная методика относится к методам последовательной коррекции, то есть исправления динамических свойств САУ с целью обеспечения требуемых показателей качества. При последовательной коррекции синтезированный регулятор включается последовательно с элементами усилительно-преобразовательного устройства. В процессе синтеза определяется структура регулятора, и рассчитываются его параметры.

На четвертом этапе проводят моделирование синтезированной САУ с применением моделирующих программ и построение переходных процессов системы для различных типовых воздействий. По результатам моделирования рассчитываются показатели качества процесса управления.

Если результаты моделирования соответствуют сформулированной в техническом задании системе исходных данных, то процесс синтеза САУ заканчивается.

Настройка на оптимум по модулю.

Настройкой контура на ОМ называется синтез регулятора с целью получения динамических характеристик замкнутого контура, близких к характеристикам колебательного звена с относительным коэффициентом затухания $\xi = 0,707$, перерегулированием $\sigma = 4,3\%$, запасом устойчивости по фазе $\theta_{\Sigma} = 45^\circ$, временем нарастания $t_H = 4,7T_{\Sigma}$.

При настройке контура на ОМ осуществляется компенсация больших постоянных времени САУ и динамические процессы будут определяться суммарными малыми постоянными времени контура.

Любой контур считается настроенным на ОМ, если его передаточная функция в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)} \quad (2.65)$$

где
е

$$T_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \tau_j$$

Рассмотрим синтез регулятора применительно к неизменяемой части САУ, которая описывается передаточной функцией

$$W_H(s) = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i s + 1) \prod_{j=1}^m (\tau_j s + 1)} \quad (2.66)$$

где T_i – компенсируемые большие постоянные времени контура.

$$W_H(s) = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i s + 1) \prod_{j=1}^m (\tau_j s + 1)}$$

где T_i – компенсируемые большие постоянные времени контура.

При выполнении условия

$$T_i \gg \sum_{j=1}^m \tau_j$$

второй сомножитель (2.66) можно записать как

$$\prod_{j=1}^m (\tau_j s + 1) \cong T_\Sigma s + 1$$

тогда передаточная функция неизменяемой части ЭП

$$W_H(s) = \frac{K}{(T_\Sigma s + 1) \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)} \quad (2.67)$$

При последовательной коррекции передаточная функция регулятора

$$W_p(s) = \frac{W(s)}{W_H(s)} \quad (2.68)$$

$$W_p(s) = \frac{W(s)}{W_H(s)} \quad (2.68)$$

После подстановки в (2.68) выражений (2.66) и (2.67), получим

$$W_p(s) = \frac{(T_\Sigma s + 1) \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}{2KT_\Sigma s (T_\Sigma s + 1)}$$

ил

и

$$W_p(s) = \frac{K_p \prod_{i=1}^n (\tau_{pi} s + 1)}{T_p s}$$

где $K_p = \frac{T_p}{2KT_\Sigma}$; $\tau_{pi} = T_i$; T_p – параметры регулятора.

В качестве примера настройки на ОМ рассмотрим настройку контура скорости (КС). ССДМ КС изображена на рис. 2.60.

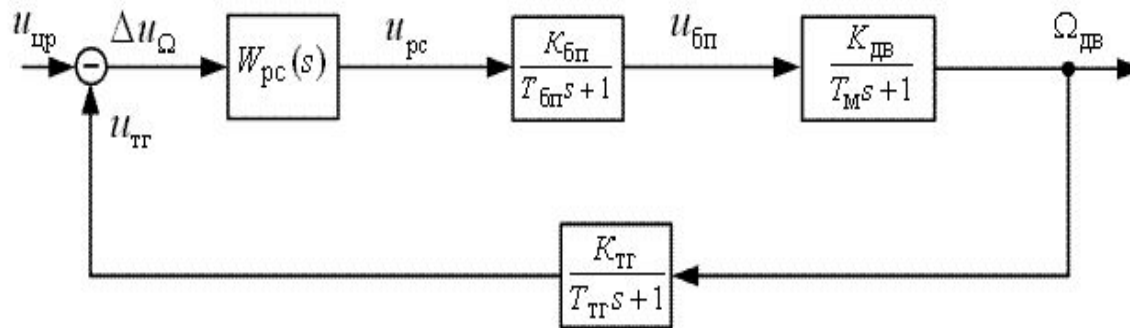


Рис. 2.60. Структурная схема динамической модели контура скорости

Передаточная функция неизменяемой части КС запишется в виде произведения передаточных функций блока питания, двигателя и тахогенератора

$$W_H(s) = \frac{K_{\text{бп}} K_{\text{дв}} K_{\text{тг}}}{(T_{\text{бп}} s + 1)(T_{\text{м}} s + 1)(T_{\text{тг}} s + 1)}$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя $T_{\text{м}}$ является постоянной времени, подлежащей компенсации.

Постоянные времени блока питания $T_{\text{бп}}$ и тахогенератора $T_{\text{тг}}$ являются малыми постоянными времени, и их влияние сказывается на высоких частотах. Поэтому произведение инерционных звеньев с малыми постоянными времени можно заменить одним инерционным звеном

$$\frac{1}{(T_{\text{бп}} s + 1)} \frac{1}{(T_{\text{тг}} s + 1)} \cong \frac{1}{(T_{\Sigma} s + 1)}$$

где $T_{\Sigma} = T_{\text{бп}} + T_{\text{тг}}$ – суммарная малая постоянная времени КС.

$$\frac{1}{(T_{\text{бп}}s + 1)} \frac{1}{(T_{\text{тг}}s + 1)} \cong \frac{1}{(T_{\Sigma}s + 1)}$$

где $T_{\Sigma} = T_{\text{бп}} + T_{\text{тг}}$ – суммарная малая постоянная времени КС.

С учетом приближенного равенства передаточная функция неизменяемой части

$$W_{\text{н}}(s) = \frac{K_{\text{бп}} K_{\text{дв}} K_{\text{тг}}}{(T_{\text{м}}s + 1)(T_{\Sigma}s + 1)}$$

С применением формулы (2.68) определяем передаточную функцию регулятора скорости (РС)

$$W_{\text{рс}}(s) = \frac{W(s)}{W_{\text{н}}(s)}$$

где передаточная функция настроенного на ОМ разомкнутого КС

$$W(s) = W_{\text{кс}}(s) = \frac{\Omega_{\text{дв}}(s)}{\Delta U_{\Omega}(s)} = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)}$$

Тогда

$$W_{\text{рс}}(s) = \frac{(T_{\text{м}}s + 1)(T_{\Sigma}s + 1)}{K_{\text{бп}} K_{\text{дв}} K_{\text{тг}} 2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)}$$

Переписывая передаточную функцию РС в стандартном виде, получим

$$W_{\text{рс}}(s) = \frac{K_{\text{рс}}(T_{\text{рс}}s + 1)}{T_{\text{рс}}s}$$

где $T_{\text{рс}} =$

$$K_{\text{рс}} = \frac{T_{\text{рс}}}{K_{\text{бп}} K_{\text{дв}} K_{\text{тг}} 2T_{\Sigma}}$$

Полученная передаточная функция РС описывает динамические свойства пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора).

Передаточная функция замкнутого КС

$$\Phi_{\text{КС}}(s) = \frac{\Omega_{\text{ДВ}}(s)}{U_{\text{ЦР}}(s)} = \frac{1/K_{\text{ТР}}}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1) + 1}$$

ил
и

$$\Phi_{\text{КС}}(s) = \frac{1/K_{\text{ТР}}}{T_{\text{КС}}^2s^2 + 2\xi T_{\text{КС}}s + 1}$$

где $T_{\text{КС}}\sqrt{2}T_{\Sigma}$ - постоянная времени КС; $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$.

На рис. 2.61, 2.62 показаны стандартные графики ЛЧХ и переходной характеристики при настройке на ОМ, полученные по передаточным функциям разомкнутого и замкнутого контура скорости соответственно.

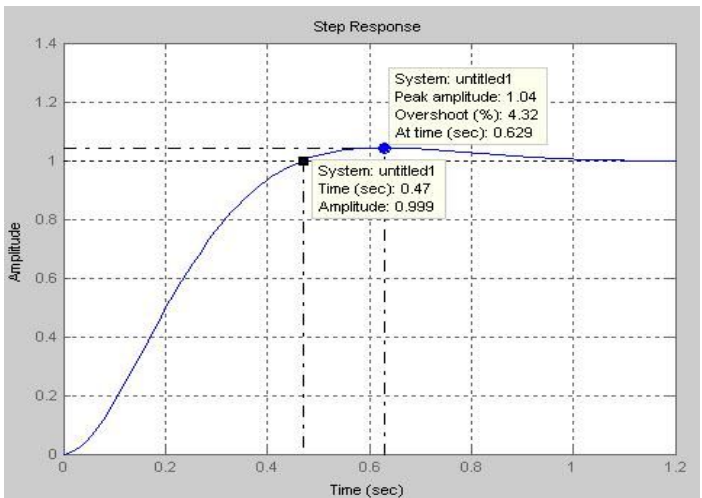
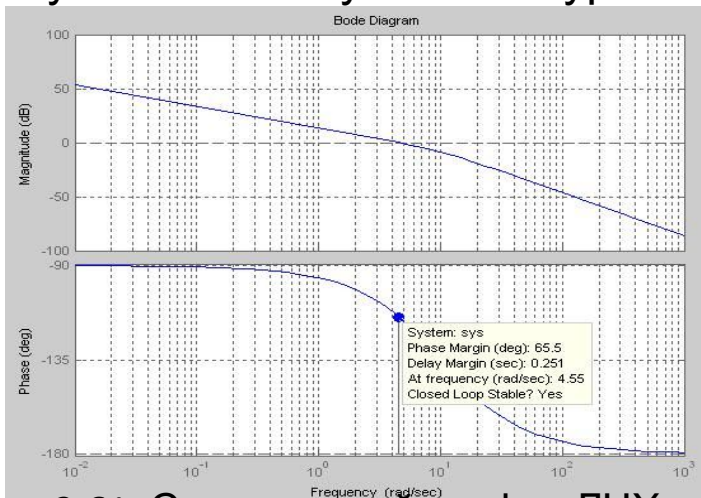


Рис. 2.61. Стандартный график ЛЧХ при настройке на оптимум по модулю

Рис. 2.62. Переходная характеристика $\Omega(t)$ при настройке на оптимум по модулю

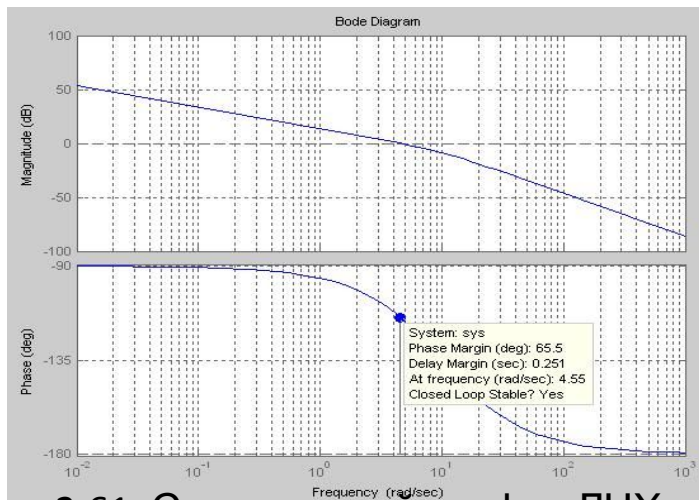


Рис. 2.61. Стандартный график ЛЧХ при настройке на оптимум по модулю

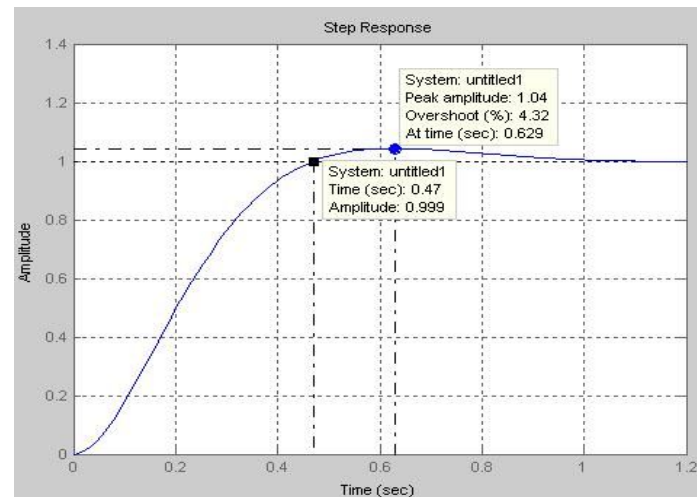


Рис. 2.62. Переходная характеристика $\Omega(t)$ при настройке на оптимум по модулю

По графикам определяем показатели качества КС, настроенного на ОМ: запас устойчивости по фазе $\theta_3 = 65,5^\circ$, перерегулирование $\sigma = 4,32\%$ и время нарастания переходного процесса $t_H \approx 4,7T_\Sigma = 0,47$ с.

Настройка на ОМ позволяет получить достаточное быстродействие при небольшом перерегулировании. В ряде случаев, когда требуется получить повышенное быстродействие и точность системы, применяют настройку на симметричный оптимум.

Настройка на симметричный оптимум.

Настройкой контура на СО называется синтез регулятора с целью получения динамических характеристик контура, близких к типовым характеристикам контура с астатизмом второго порядка ($\nu=2$), перегуливанием $\theta_{\Sigma} = 433\%$, запасом устойчивости по фазе и временем нарастания переходного процесса $t \approx 3.1 T_{\Sigma}$.

В основе процедуры настройки на СО лежит допущение о том, что в рабочем диапазоне частот выражение (2.67), с учетом

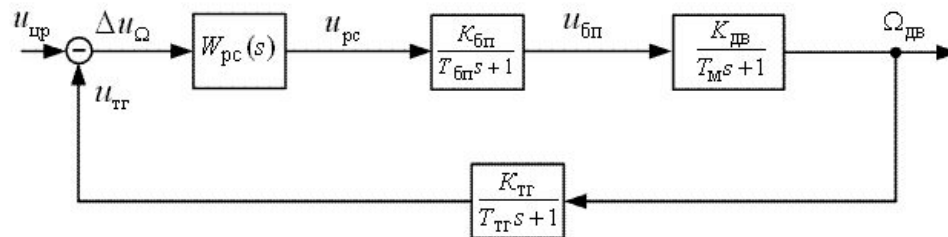
$$\frac{T_i}{T_{\Sigma}} \gg 1$$

можно представить в виде

$$W_H(s) = \frac{K}{(T_{\Sigma}s + 1) \prod_{i=1}^n T_i s}$$

Применительно к ССДМ КС (рис. 2.60) передаточная функция неизменяемой части

$$W_H(s) = \frac{K_{\text{бп}} K_{\text{дв}} K_{\text{тг}}}{T_M s (T_{\Sigma} s + 1)}$$



Для получения желаемых результатов нужно выбрать ПИ-регулятор с параметрами

$$K_{pc} = \frac{T_M}{K_{\sigma\Pi} K_{дв} K_{тг} 2T_{\Sigma}} \quad \text{и} \quad T_{pc} = \frac{T_{\Sigma}}{4}$$

Тогда передаточная функция КС, настроенного на СО

$$W_{КС}(s) = \frac{(4T_{\Sigma}s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 s^2 (T_{\Sigma}s + 1)} \quad (2.69)$$

Из выражения (2.69) видно, что свойства КС соответствуют свойствам контура с астатизмом 2-го порядка. Динамические свойства КС иллюстрируются графиками (рис. 2.63, 2.64). Показатели качества КС, настроенного на СО, имеют следующие значения: $\sigma_3 \approx 37\%$, перерегулирование $\sigma = 43\%$ и время нарастания переходного процесса $t \approx 3.1 T_{\Sigma} = 0.31 \text{ с}$

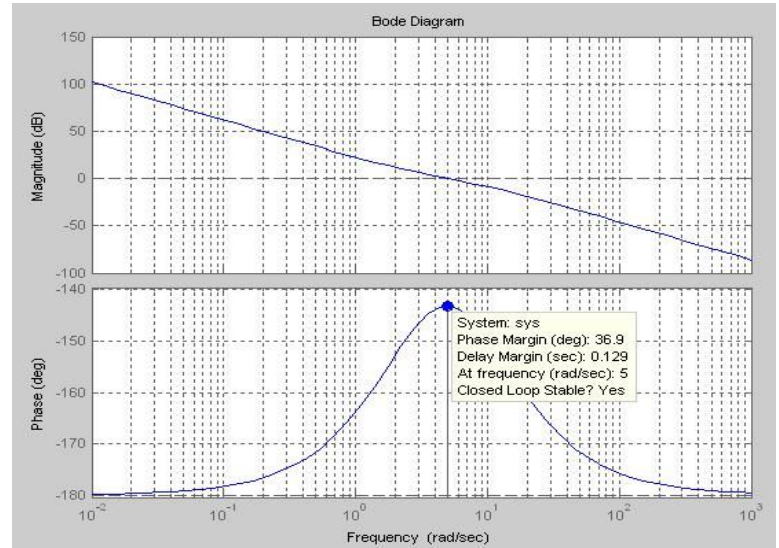
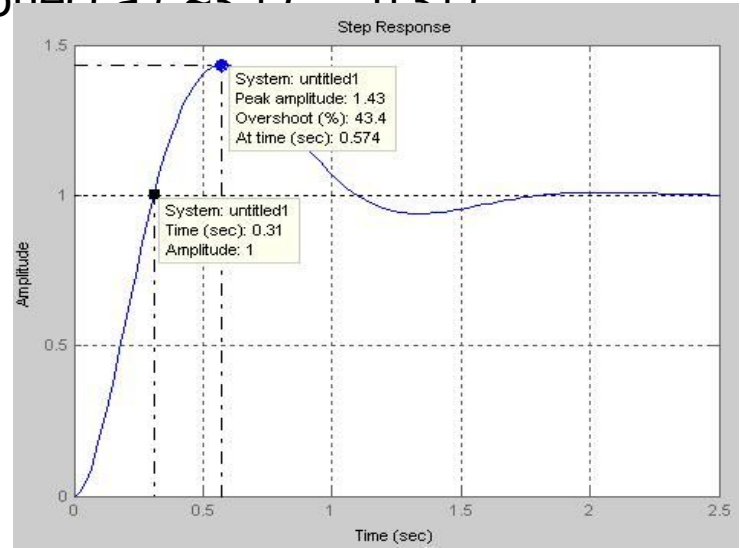
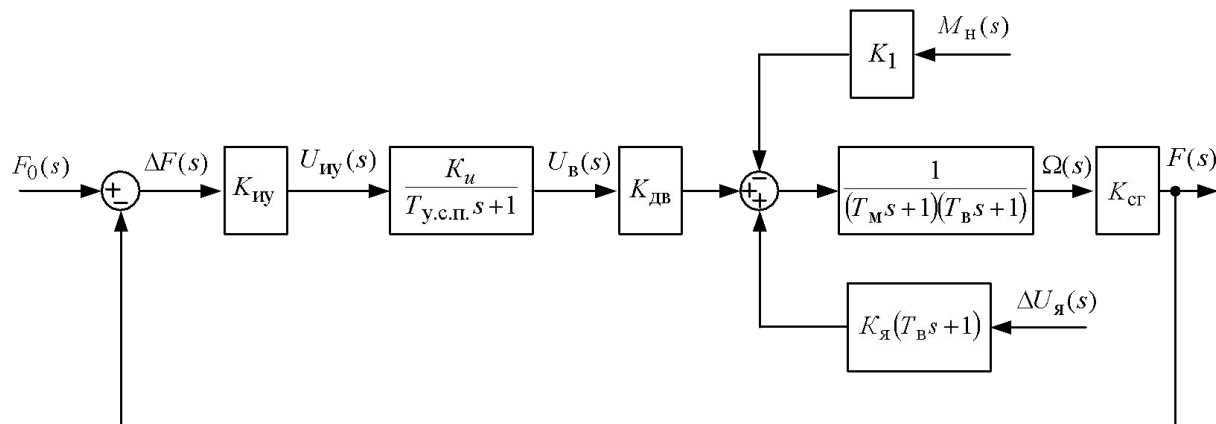


Рис. 2.63. Переходная характеристика $\Omega(t)$ при настройке на симметричный оптимум

Рис. 2.64. Стандартный график ЛЧХ при настройке на симметричный оптимум

Пример 2.21. Синтезировать регулятор частоты, обеспечивающий настройку ССЧСГ на ОМ. Данные для расчёта принять из примера 2.15.



Согласно ССДМ ССЧСГ принять следующие исходные данные: $K_{иу} = 5$ В/Гц; $K_u = 4,22$; $T_{у.с.п.} = 0,0125$ с; $K_{дв} = 1,706$ рад/В·с; $T_m = 0,4$ с; $T_в = 0,02$ с; $K_{сг} = 0,48$ Гц·с/рад; $K_1 = 10$ 1/Н·м·с; $K_я = 227$ рад/В·с; $M_H = 0,2$ Н·м; $f_0 = 500$ Гц; $\Delta U_я = 2$ В.

Решение. Приравниваем передаточную функцию разомкнутой ССЧСГ с учётом включенного последовательно с усилителем регулятора частоты к передаточной функции контура, настроенного на ОМ

$$W_{рч}(s) \frac{K_{иу} K_u K_{дв} K_{сг}}{(T_{у.с.п.} s + 1)(T_m s + 1)(T_в s + 1)} = \frac{1}{2T_{\Sigma} s (T_{\Sigma} s + 1)},$$

где суммарная малая постоянная времени

$$T_{\Sigma} = T_{у.с.п.} + T_в.$$

Тогда передаточная функция регулятора частоты

$$W_{рч}(s) = \frac{T_m s + 1}{2K_{иу} K_u K_{дв} K_{сг} T_{\Sigma} s} \cdot |$$

Полученное выражение соответствует передаточной функции ПИ-регулятора. Подставив в формулу численные значения, получим

$$W_{\text{рч}}(s) = \frac{0,4s + 1}{2 \cdot 5 \cdot 4,22 \cdot 1,706 \cdot 0,48 \cdot (0,0125 + 0,02)s} = \frac{0,4s + 1}{1,123s}$$

ССДМ ССЧСТ в системе Simulink представлена на рис. 2.65.

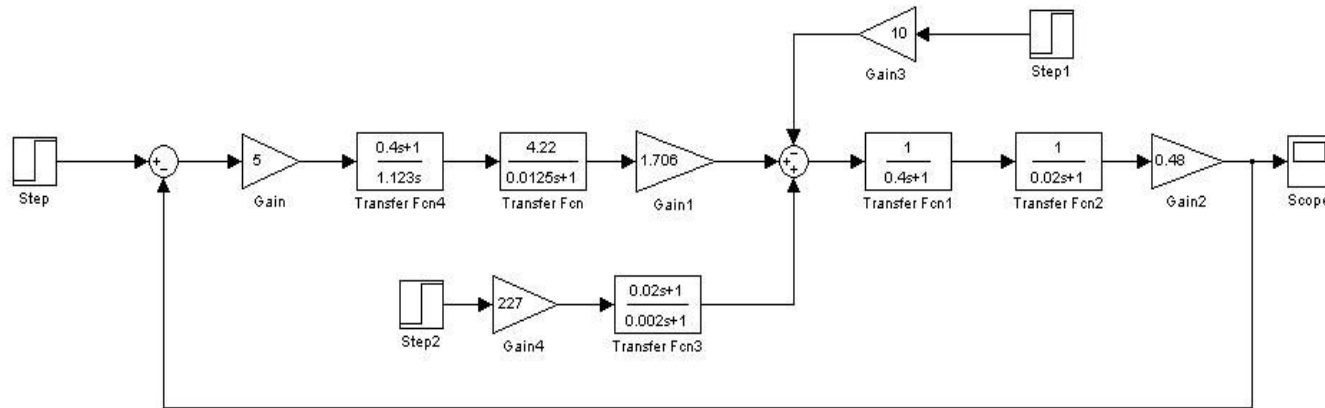


Рис. 2.65. Структурная схема динамической модели ССЧСТ в системе Simulink

Для моделирования в блоке Step задаём входное воздействие $f_0 = 500$ Гц, а в блоках Step 1 и Step 2 значения момента нагрузки M_H и изменения напряжения на якоре $\Delta U_{\text{я}}$ равными нулю. На рис. 2.66 изображена соответствующая переходная характеристика.

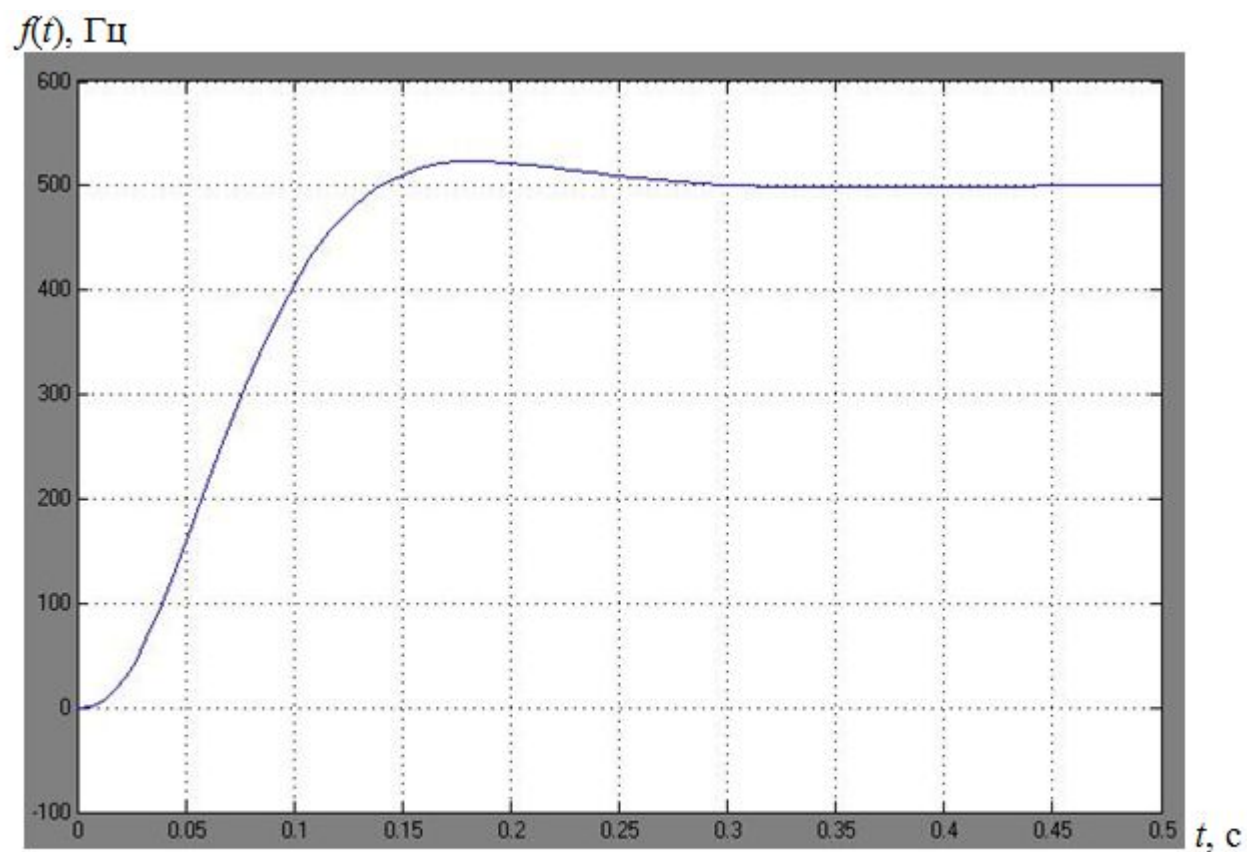


Рис. 2.66. Переходная характеристика контура скорости по задающему воздействию f_0

Для построения переходной характеристики по моменту нагрузки M_H устанавливаем в блоках Step и Step 2 нулевые значения, а в блоке Step 1 – момент сопротивления $M_H^0 = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Полученная переходная характеристика представлена на рис. 2.67.

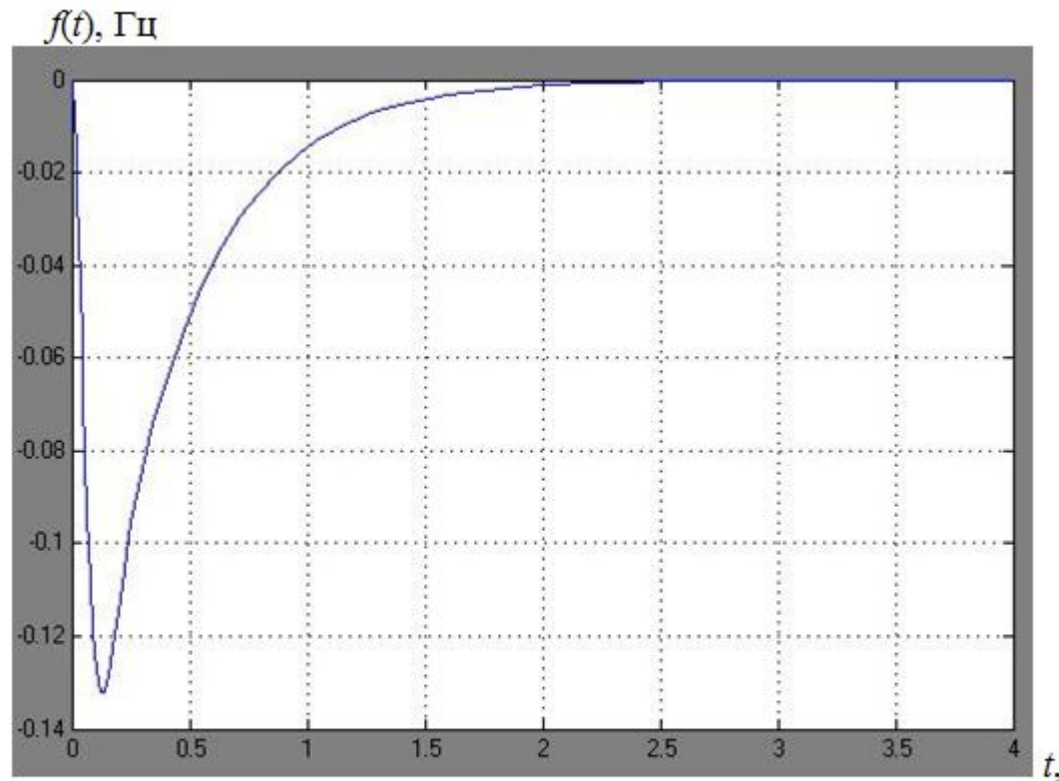


Рис. 2.67. Переходная характеристика контура скорости по моменту нагрузки M_H

Для построения переходной характеристики по изменению напряжения на якоре $\Delta U_{\text{я}}$ устанавливаем в блоках Step и Step 1 нулевые значения. Линейно возрастающее воздействие моделируется при помощи блока Ramp, находящегося в библиотеке блоков Sources, в диалоговом окне которого устанавливаем значение $\Delta \dot{U}_{\text{я}} = 2 \text{ В/с}$. Переходная характеристика представлена на рис. 2.68.

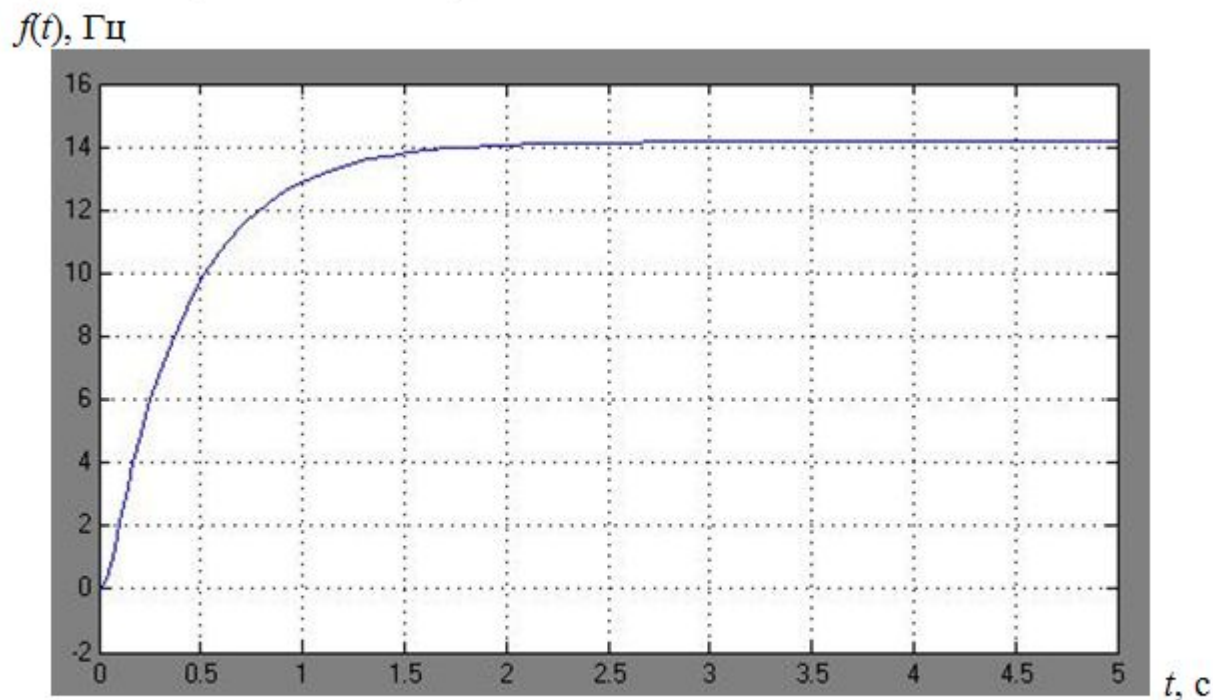


Рис. 2.68. Переходная характеристика контура скорости по изменению напряжения на якоре $\Delta U_{\text{я}}$

Переходим к анализу полученных графиков. По графику на рис. 2.66 определяем максимальное значение частоты синхронного генератора $f_{\max} = 523$ Гц и установившееся значение частоты $f_{уст} = 500$ Гц. По этим данным рассчитываем перегулирование

$$\sigma = \frac{f_{\max} - f_{уст}}{f_{уст}} \cdot 100 \% = \frac{523 - 500}{500} \cdot 100 \% = 4,6 \%$$

Время нарастания t_H определяется в первой точке пересечения графика переходной функции и установившегося значения $f_{уст}$ и составляет

$$t_H^{KC} = 0,14 \text{ с.}$$

Проверяем соответствие полученного значения требованиям настройки на ОМ

$$t_H^{KC} \cong 4,7T_{\Sigma} = 4,7 \cdot 0,0325 = 0,15 \text{ с.}$$

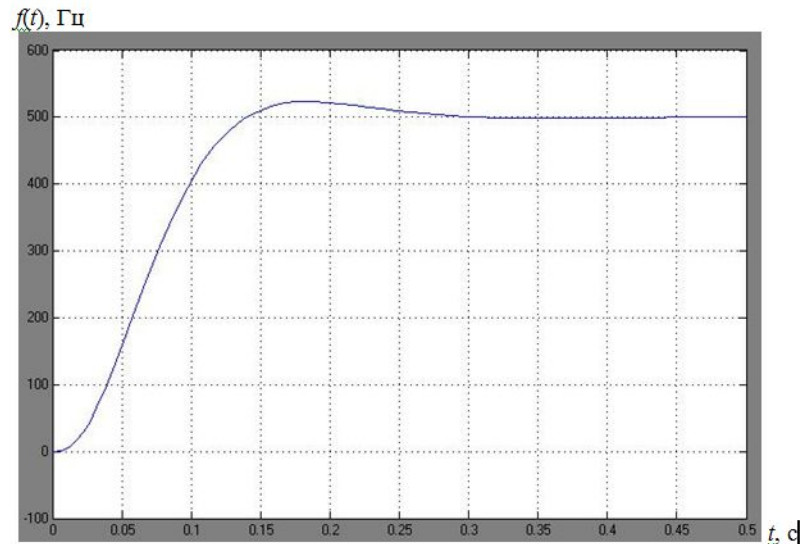


Рис. 2.66. Переходная характеристика контура скорости по задающему воздействию f_0

Из анализа графика на рис. 2.67 следует, что при воздействии неизменного по величине момента нагрузки M_H моментная составляющая ошибки $\Delta f_{ст}^M$ примерно через 2 с становится равной нулю. Увеличение точности обусловлено наличием в структуре регулятора частоты интегральной составляющей.

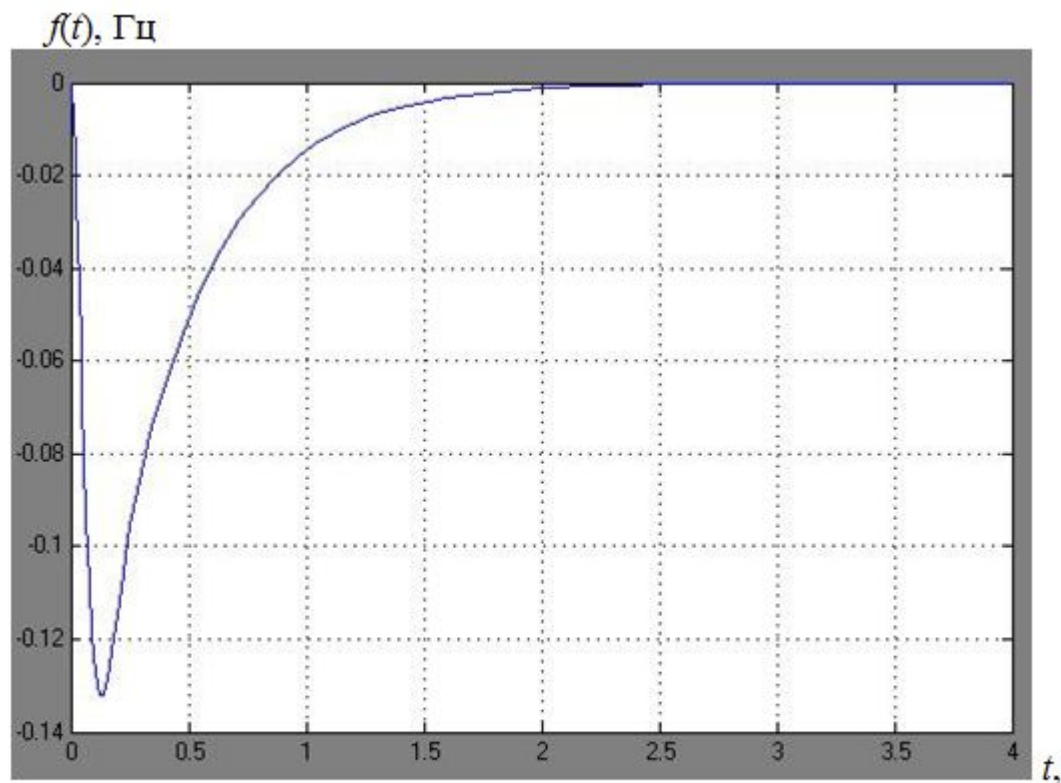


Рис. 2.67. Переходная характеристика контура скорости по моменту нагрузки M_H

При воздействии на систему линейно возрастающего напряжения на якоре $\Delta \dot{U}_я t$ появляется ошибка регулирования. Из графика на рис. 2.68 следует, что $\Delta f_{ст}^{\Delta u} = 14,16$ Гц. Рассчитаем установившуюся ошибку по формуле

$$\Delta f_{ст}^{\Delta u} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) \frac{\Delta \dot{U}_я}{s^2}.$$

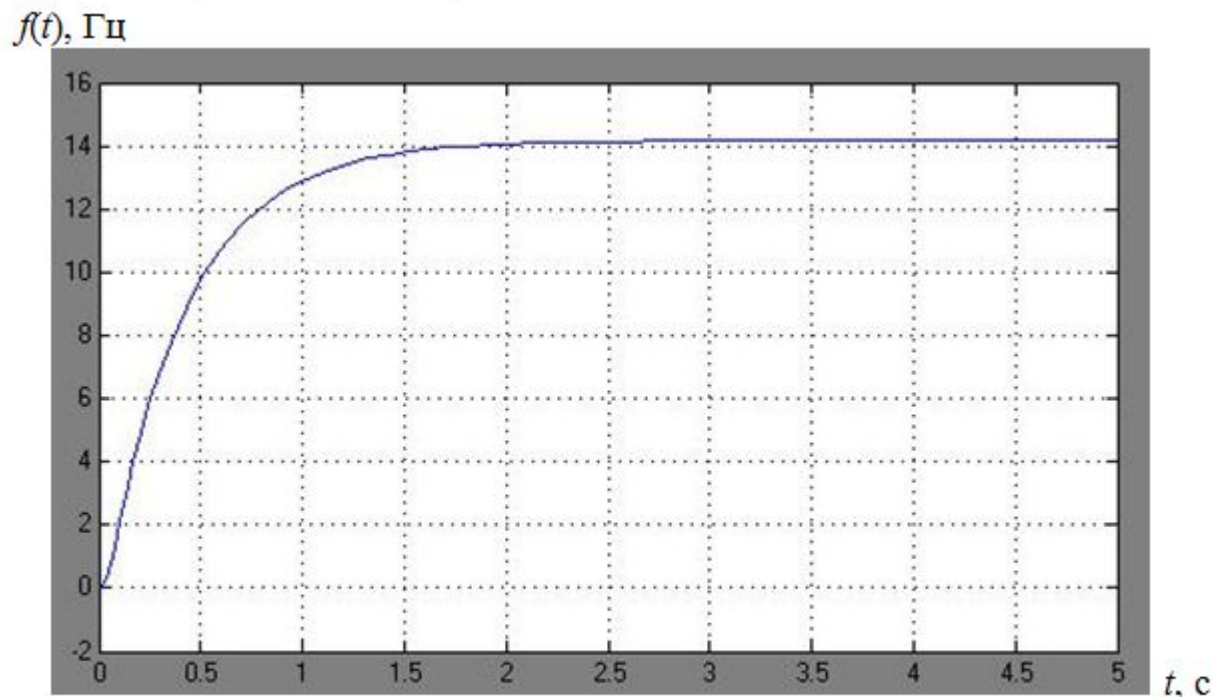


Рис. 2.68. Переходная характеристика контура скорости по изменению напряжения на якоре $\Delta U_я$

С учётом регулятора частоты передаточная функция замкнутой ССЧСГ по ошибке $\Delta F(s)$ относительно возмущающего воздействия $\Delta U_{\text{я}}(s)$ примет вид

$$\Phi_{\Delta f}^{\Delta u}(s) = -\frac{2T_{\Sigma}K_{\text{я}}K_{\text{сг}}^2K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{в}}s+1)s}{2T_{\Sigma}K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{м}}s+1)(T_{\text{в}}s+1)s + 1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{+K_{\text{иу}}K_uK_{\text{дв}}K_{\text{сг}}(T_{\text{м}}s+1)}.$$

Вычислив соответствующий предел, получим

$$\Delta f_{\text{сг}}^{\Delta u} = -2T_{\Sigma}K_{\text{я}}K_{\text{сг}}\Delta \dot{U}_{\text{я}} = -2 \cdot 0,0325 \cdot 227 \cdot 0,48 \cdot 2 = -14,16 \text{ Гц.}$$

Для построения ЛЧХ необходимо написать программу в Command Window системы MatLab. Передаточная функция разомкнутой ССЧСГ с учётом компенсации

$$W(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}(T_{\text{у.с.п.}}s+1)(T_{\text{в}}s+1)s}.$$

Раскрывая скобки в полученном выражении, запишем программу

```
num = [1];
den = [1.625e-005 2.1125e-003 0.065 0];
sys = tf(num, den);
bode(sys)
```

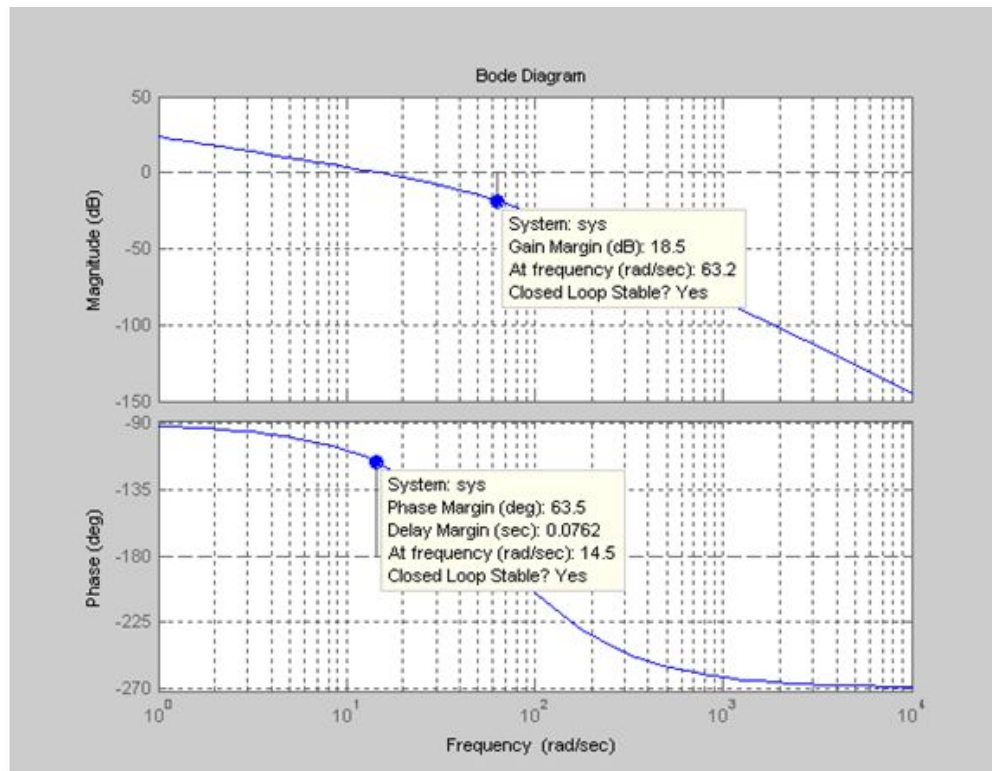


Рис. 2.69. ЛЧХ ССЧСГ, настроенной на ОМ

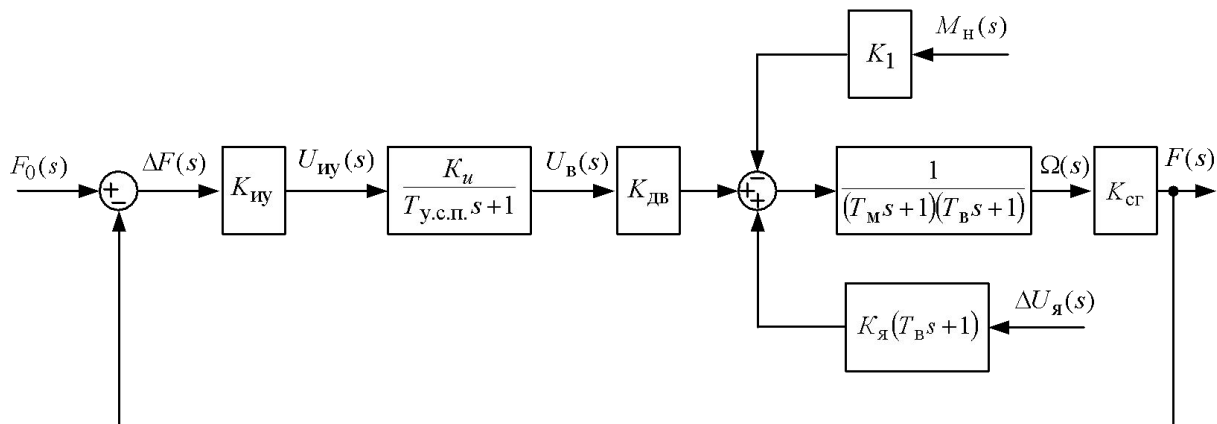
Запасы устойчивости по фазе и амплитуде составляют $L_3 = 18,5$ дБ (Gain Margin) и $\theta_3 = 63,5^\circ$ (Phase Margin) соответственно.

Результаты моделирования подтверждают правильность расчёта параметров регулятора частоты и позволяют сделать вывод о том, что ССЧСГ настроена на ОМ.

Вместе с тем, при обработке линейно возрастающего воздействия по цепи якоря величина погрешности является значительной и равна $-14,16$ Гц. Для её устранения представляется целесообразным применить настройку на симметричный оптимум, что позволит повысить порядок астатизма системы.

Пример 2.22. Синтезировать регулятор для настройки ССЧСГ, схема которой представлена на рис. 2.48, на симметричный оптимум.

Провести моделирование системы: получить графики переходных функций по задающему воздействию f_0 , по моменту сопротивления нагрузки M_H , а также по линейно возрастающему изменению напряжения на якоре $\Delta \dot{U}_я t$; оценить установившиеся ошибки системы; построить графики ЛЧХ разомкнутой ССЧСГ; провести анализ результатов моделирования.



Согласно ССДМ ССЧСГ принять следующие исходные данные: $K_{иу} = 5$ В/Гц; $K_u = 4,22$; $T_{у.с.п.} = 0,0125$ с; $K_{дв} = 1,706$ рад/В·с; $T_M = 0,4$ с; $T_B = 0,02$ с; $K_{сг} = 0,48$ Гц·с/рад; $K_1 = 10$ 1/Н·м·с; $K_я = 227$ рад/В·с; $M_H = 0,2$ Н·м; $f_0 = 500$ Гц; $\Delta U_я = 2$ В.

Решение. Передаточную функцию регулятора частоты определим из соотношения

$$W_{\text{рч}}(s) \frac{K_{\text{иу}} K_u K_{\text{дв}} K_{\text{сг}}}{(T_{\text{у.с.п.}} s + 1)(T_{\text{м}} s + 1)(T_{\text{в}} s + 1)} = \frac{(4T_{\Sigma} s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 s^2 (T_{\Sigma} s + 1)},$$

тогда передаточная функция регулятора запишется как

$$W_{\text{рч}}(s) = \frac{(T_{\text{м}} s + 1)(4T_{\Sigma} s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 K_{\text{иу}} K_u K_{\text{дв}} K_{\text{сг}} s^2}.$$

Из полученного выражения следует, что структура регулятора частоты представляет собой последовательное соединение двух ПИ-регуляторов. Подставляя численные значения, получим

$$W_{\text{рч}}(s) = \frac{(0,4s + 1)(4 \cdot 0,0325s + 1)}{8 \cdot 0,0325^2 \cdot 5 \cdot 4,22 \cdot 1,706 \cdot 0,48s^2} = \frac{0,052s^2 + 0,53s + 1}{0,146s^2}.$$

ССДМ ССЧСГ с рассчитанным регулятором частоты представлена на рис. 2.70.

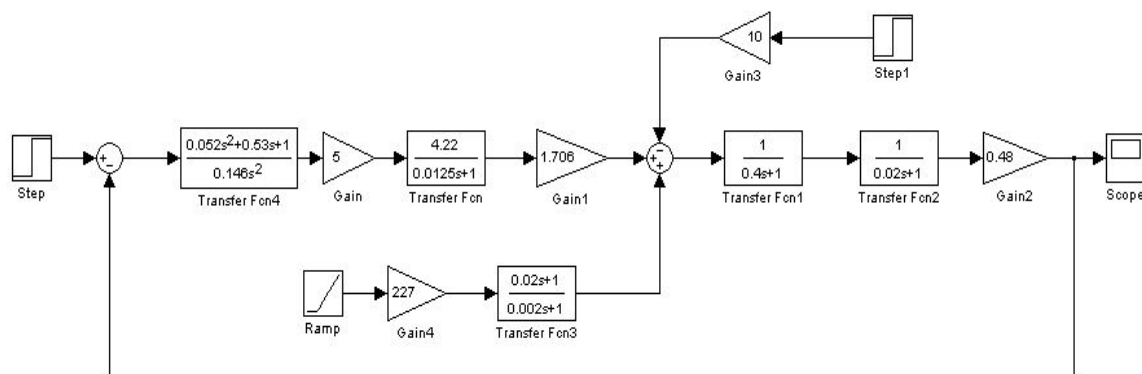


Рис. 2.70. Структурная схема динамической модели ССЧСГ, настроенной на симметричный оптимум

В результате моделирования получены: график переходной функции при обработке задающего воздействия $f_0 = 500$ Гц (рис. 2.71), график ошибки при обработке линейно возрастающего возмущающего воздействия $\Delta U_{\text{я}} = 2$ В/с (рис. 2.72) и графики ЛЧХ (рис. 2.73).

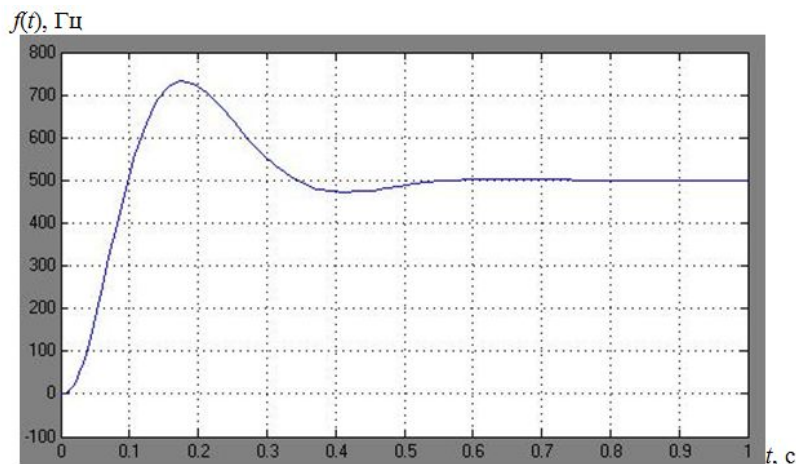


Рис. 2.71. Переходная характеристика контура скорости по задающему воздействию f_0

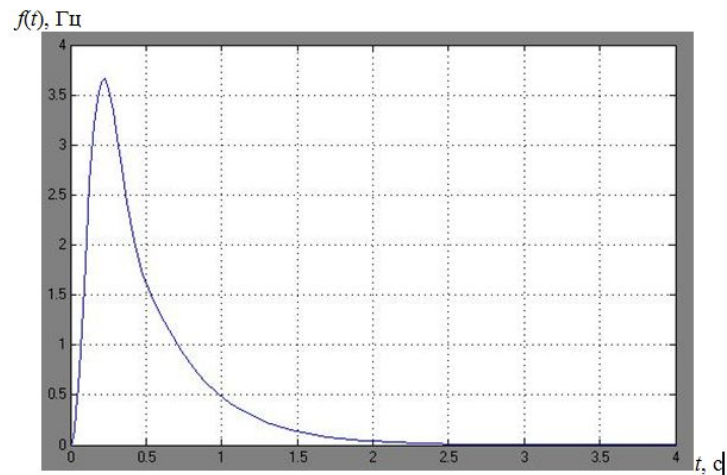


Рис. 2.72. Переходная характеристика контура скорости при обработке линейно возрастающего напряжения на якоре $\Delta \dot{U}_{\text{я}} t$

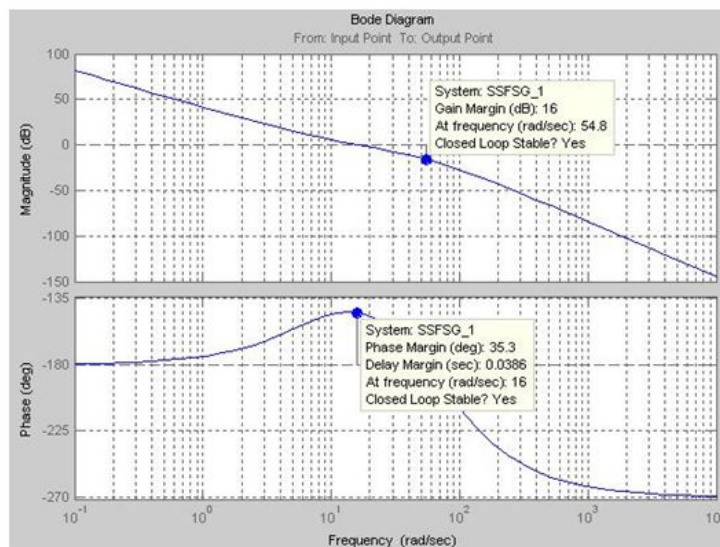


Рис. 2.73. ЛЧХ ССЧСГ, настроенной на симметричный оптимум

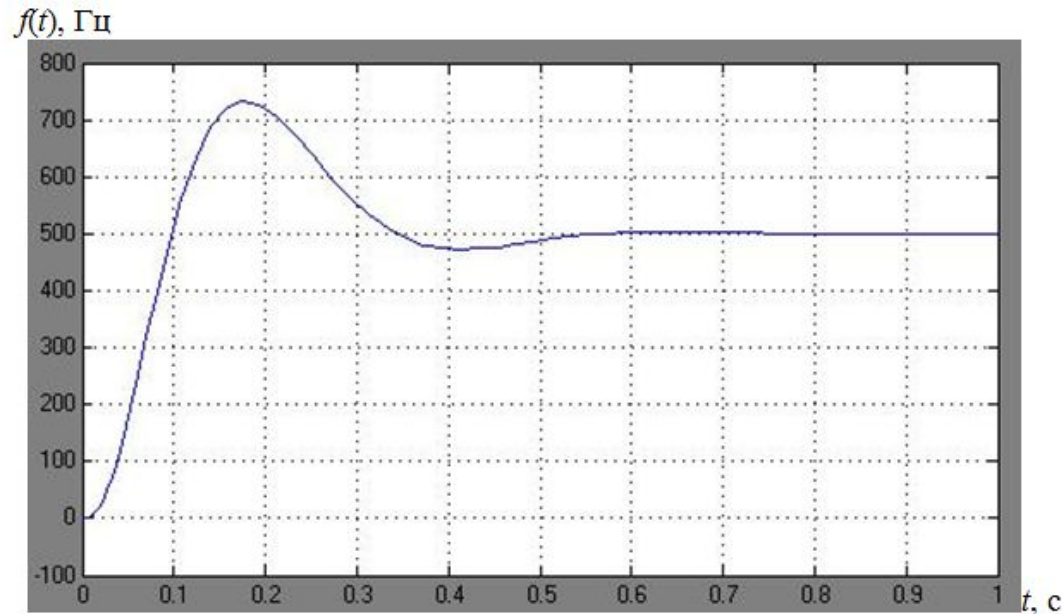


Рис. 2.71. Переходная характеристика контура скорости по задающему воздействию f_0

Как видно из анализа графика на рис. 2.71, появление в структуре ССЧСТ второго интегрирующего звена увеличило перерегулирование

$$\sigma = \frac{f_{\max} - f_{\text{уст}}}{f_{\text{уст}}} \cdot 100 \% = \frac{523 - 500}{500} \cdot 100 \% = 46 \%$$

и уменьшило время нарастания до величины

$$t_{\text{н}}^{\text{КЧ}} = 0,1 \text{ с,}$$

соответствующей расчётному значению

$$t_{\text{н}}^{\text{КЧ}} \cong 3,1T_{\Sigma} = 3,1 \cdot 0,0325 = 0,1 \text{ с.}$$

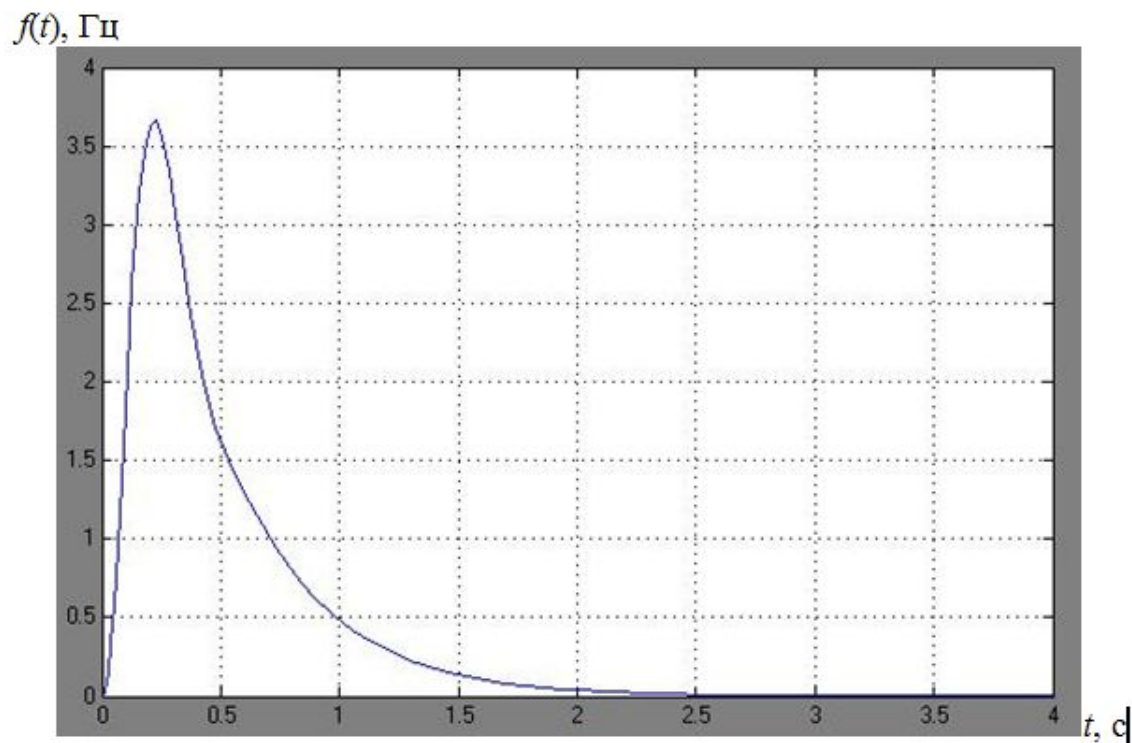


Рис. 2.72. Переходная характеристика контура скорости при отработке линейно возрастающего напряжения на якоре $\Delta \dot{U}_я t$

Из графика, представленного на рис. 2.72, видно, что за время 2,5 с составляющая ошибки при отработке линейно возрастающего напряжения на якоре $\Delta U_я$ становится равной нулю. Это свидетельствует о том, что система, настроенная на СО, стала точнее.

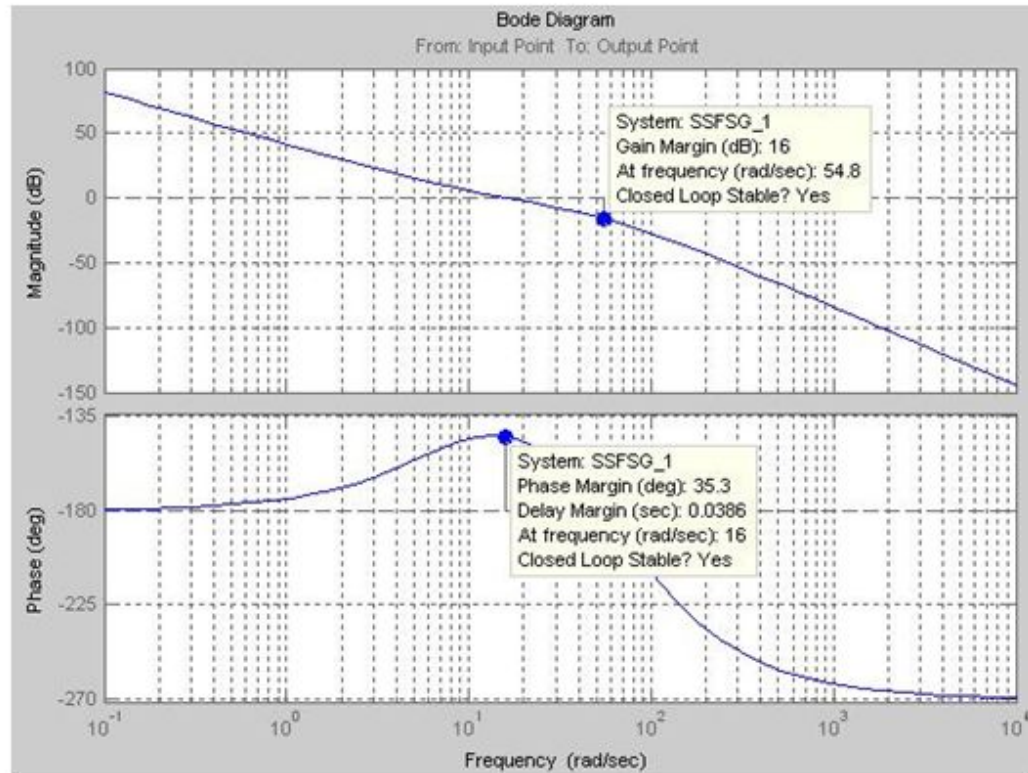


Рис. 2.73. ЛЧХ ССЧСГ, настроенной на симметричный оптимум

Запасы устойчивости по фазе и амплитуде составляют $L_3 = 16$ дБ (Gain Margin) и $\theta_3 = 35,3^\circ$ (Phase Margin), что подтверждает правильность расчёта параметров регулятора скорости.