

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра технической эксплуатации
авиационных электросистем
и пилотажно-навигационных комплексов

А.Г. Демченко

АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы

*для студентов II–III курсов
направления 25.03.02
всех форм обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2021

УДК 681.51
ББК 6Ф6.5
Д31

Рецензент:

Перегудов Г.Е. – канд. техн. наук

Демченко А.Г.

Д31 Автоматика и управление [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы / А.Г. Демченко. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 24 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Автоматика и управление» по учебному плану для студентов II–III курсов направления 25.03.02 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 24.02.2021 г. и методического совета 09.03.2021 г.

УДК 681.51
ББК 6Ф6.5

В авторской редакции

Подписано в печать 28.05.2021 г.
Формат 60x84/16 Печ. л. 1,5 Усл. печ. л. 1,395
Заказ № 784/0519-УМП41 Тираж 30 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2021

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование устойчивости и точности работы системы автоматического управления частоты вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при наличии управляющего воздействия, при наличии управляющего и возмущающего воздействий, а также при введении дополнительных связей по производной и интегралу от сигнала ошибки регулирования.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Схема САУ скоростью вращения ДПТ

Процессы, происходящие в двигателе постоянного тока, могут быть описаны следующими уравнениями: уравнение электрического состояния цепи якоря двигателя (1), уравнение электромагнитного момента (2), уравнение ЭДС обмотки якоря (3):

$$E_{\text{я}} + I_{\text{я}}R_{\text{я}}; \quad (1)$$

$$M_{\text{эм}} = C_{\text{м}}I_{\text{я}}\Phi_{\text{в}}; \quad (2)$$

$$E_{\text{я}} = C_{\text{е}}\Phi_{\text{в}}n, \quad (3)$$

где U – напряжение сети, В; $E_{\text{я}}$ – противо-ЭДС, В; $I_{\text{я}}$ – ток якорной обмотки, А; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной обмотки, Ом; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент, Н·м; $C_{\text{м}}, C_{\text{е}}$ – коэффициенты, зависящие от конструкции ЭМ; n – частота вращения якоря, об/мин.

Подставляя (3) в (1) и выражая частоту вращения n получим:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{C_{\text{е}}\Phi_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Из формулы видно, что регулировать частоту вращения вала можно изменяя напряжение, приложенное к якорю U (якорное регулирование), сопротивление в цепи якоря $R_{\text{я}}$ (реостатное регулирование) и магнитный поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ (полусное регулирование).

Якорное регулирование применяется для двигателей с независимым возбуждением. У двигателей с другими типами возбуждений изменение напряжения влечёт за собой также изменение магнитного потока. Регулирование напряжения возможно при использовании регулируемого источника напряжения.

При реостатном регулировании в цепь якоря включают добавочный управляемый резистор. Реостатное регулирование позволяет менять частоту вращения от номинального значения до нуля. Однако данный способ применяется редко и только для двигателей малой мощности. Это связано с большими потерями мощности на добавочном резисторе.

Полусное регулирование осуществляется за счёт изменения магнитного потока. Магнитный поток возбуждения меняется при изменении тока возбуждения. Регулировать ток возбуждения возможно за счёт включения в цепь обмотки возбуждения регулировочного реостата. Из выражения (4) видно, что при уменьшении магнитного потока частота вращения увеличивается.

Полусное регулирование является удобным и экономичным, так как ток возбуждения весьма мал по сравнению с током якоря, а размеры регулировочного реостата и потери в нем невелики. Однако данный способ позволяет только увеличивать частоту вращения при уменьшении магнитного потока. Увеличение же потока приведёт к перегреву обмотки возбуждения и выходу её из строя. Это аварийный режим работы. Кроме того, увеличение магнитного потока ограничено насыщением стального магнитопровода.

Наиболее эффективное управление частотой вращения двигателя достигается при совместном использовании якорного и полусного регулирования. При таком регулировании обеспечивается плавное регулирование частотой в очень широком диапазоне. Данное свойство является одним из главных преимуществ двигателей постоянного тока.

Рассмотрим реальную систему автоматического управления скоростью вращения двигателя постоянного тока. Принципиальная схема САУ представлена на рис. 1.

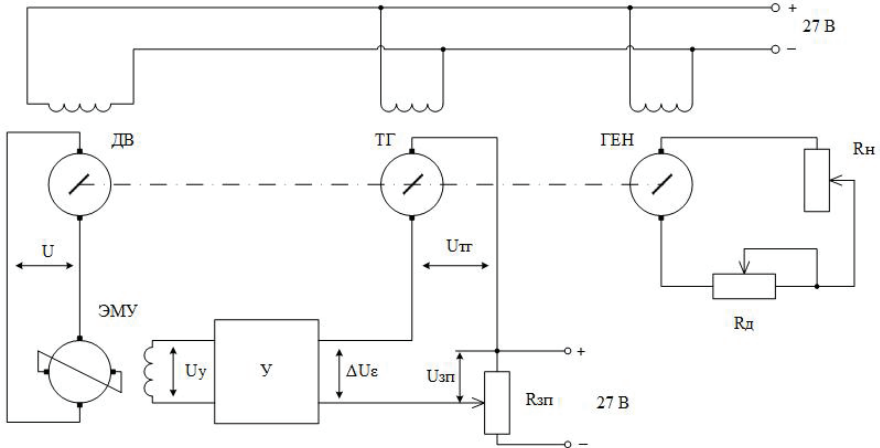


Рис. 1. Принципиальная схема САУ скоростью вращения ДПТ

В рассматриваемой системе регулирование частоты вращения осуществляется путём изменения величины напряжения U , прикладываемого к обмотке якоря двигателя. Таким образом, в данной системе реализован принцип якорного регулирования.

Система автоматического управления скоростью вращения ДПТ состоит из:

1. Самого двигателя постоянного тока (ДВ), являющегося объектом регулирования.
2. Тахогенератора (ТГ), который механически связан с валом двигателя. Тахогенератор является звеном отрицательной обратной связи, вырабатывая сигнал пропорциональный частоте вращения двигателя.
3. Генератора (ГЕН), также механически связанного с валом двигателя. Генератор является нагрузкой для двигателя. Он создаёт возмущающее воздействие в виде момента нагрузки M_n на валу.
4. Задающего потенциометра $R_{зп}$, с помощью которого устанавливается требуемая скорость двигателя.
5. Усилитель по напряжению ($У$). На усилитель приходят сигналы от тахогенератора и задающего потенциометра. Усилитель подключён к обмотке возбуждения ЭМУ.
6. Электромашинный усилитель мощности (ЭМУ), подключённый к обмотке якоря двигателя. ЭМУ вырабатывает напряжение, с помощью которого происходит управление скоростью двигателя.

Схема работает следующим образом.

Перемещением движка потенциометра $R_{зп}$ задаётся частота вращения двигателя, которая в дальнейшем будет поддерживаться системой. Напряжение с потенциометра $U_{зп}$, которое является управляющим воздействием, подаётся на усилитель по напряжению ($У$). Усиленный сигнал U_y с усилителя подаётся на обмотку возбуждения электромашинного усилителя. Напряжение U на выходе ЭМУ подаётся на обмотку якоря двигателя (ДВ). Вследствие чего, согласно выражению (4), частота вращения двигателя начнёт возрастать до определённого значения, заданного потенциометром $R_{зп}$. После достижения скорости двигатель продолжит работу в установившемся режиме.

При увеличении момента нагрузки на валу двигателя M_n частота вращения будет уменьшаться. Этот сигнал является возмущающим воздействием. Напряжение тахогенератора $U_{тг}$ пропорционально частоте вращения двигателя. Поэтому с уменьшением частоты вращения напряжение с тахогенератора также будет уменьшаться. Тахогенератор является отрицательной обратной связью, подключённой навстречу к задающему потенциометру. Разность напряжения потенциометра и тахогенератора пропорциональна ошибке регулирования и будет определяться следующей формулой:

$$\Delta U_{\varepsilon} = U_{зп} - U_{тг}, \quad (5)$$

где ΔU_{ε} – разность напряжений потенциометра и тахогенератора, В;

$U_{зп}$ – напряжение с задающего потенциометра, В;

$U_{тг}$ – напряжение тахогенератора, В.

Из выражения (5) видно, что при уменьшении напряжения тахогенератора разность напряжений будет увеличиваться. Эта разность подаётся на усилитель, а потом на обмотку возбуждения ЭМУ. После чего сигнал с ЭМУ подаётся на обмотку якоря двигателя. Согласно выражению (4) с увеличением напряжения на обмотке якоря частота вращения будет также увеличиваться. Это будет происходить до тех пор, пока сигнал разности напряжений не достигнет заданной величины. После чего двигатель продолжит работу в установившемся режиме.

$$M_{\text{н}} \uparrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow U_{\text{тг}} \downarrow \Rightarrow \Delta U_{\varepsilon} \uparrow \Rightarrow U_y \uparrow \Rightarrow U \uparrow \Rightarrow n \uparrow$$

2.2. Передаточные функции и структурная схема САУ

Запишем передаточные функции для элементов схемы.

1. Передаточная функция двигатель постоянного тока является апериодическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}}s + 1}, \quad (6)$$

где $K_{\text{д}}$ – передаточный коэффициент двигателя, $\frac{\text{рад/с}}{\text{В}}$;
 $T_{\text{д}}$ – постоянная времени двигателя, с.

2. Тахогенератор также является машиной постоянного тока. В идеальных условиях передаточную функцию тахогенератора можно считать усилительным звеном:

$$W_{\text{тг}}(s) = K_{\text{тг}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{тг}}$ – передаточный коэффициент тахогенератора, $\frac{\text{В}}{\text{рад/с}}$.

Однако в реальных условиях тахогенератор работает под нагрузкой, а значит, в этом случае передаточная функция тахогенератора принимает вид апериодического звена, как у обычного генератора.

3. Усилитель по напряжению является усилительным (пропорциональным) звеном:

$$W_y(s) = K_y, \quad (8)$$

где K_y – передаточный коэффициент усилителя.

4. Электромашинный усилитель мощности также является машиной постоянного тока, а именно генератором. Однако из-за особенностей своей конструкции передаточная функция ЭМУ будет отличаться.

Конструктивной особенностью ЭМУ является то, что на коллекторе якоря установлено два пары щёток (рис. 2). Щётки 1 – 1 располагаются на поперечной оси машины и закорочены. Щётки 2 – 2 располагаются на продольной оси. Такие усилители называются двухступенчатые ЭМУ с поперечным полем.

Так как щётки 1 – 1 закорочены, следовательно, сопротивление цепи мало. Поэтому небольшая по величине ЭДС, наводимая потоком возбуждения $\Phi_{\text{в}}$, создаст в цепи значительный по величине ток I_1 . В свою очередь этот ток соз-

даст значительный поперечный поток Φ_{Π} , являющимся входным магнитным потоком для второй (основной) ступени усиления мощности.

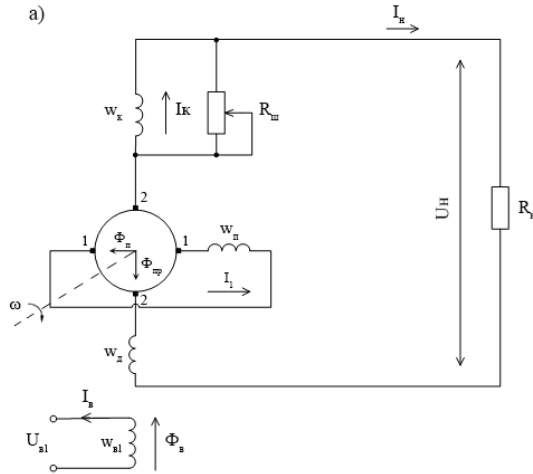


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ЭМУ

Передаточная функция ЭМУ с поперечным полем после преобразований запишется в виде:

$$W_{\text{ЭМУ}}(s) = \frac{K_{\text{ЭМУ}}}{(T_y s + 1)(T_k s + 1)}, \quad (9)$$

где $K_{\text{ЭМУ}}$ – передаточный коэффициент ЭМУ по напряжению;

T_y – постоянная времени цепи обмотки управления, с;

T_k – постоянная времени короткозамкнутой цепи, с.

Полученная передаточная функция соответствует аperiodическому звену второго порядка.

По уравнениям (6) – (9) составим структурно-динамическую схему системы автоматического управления скоростью вращения двигателя постоянного тока. Данная схема приведена на рис. 3.

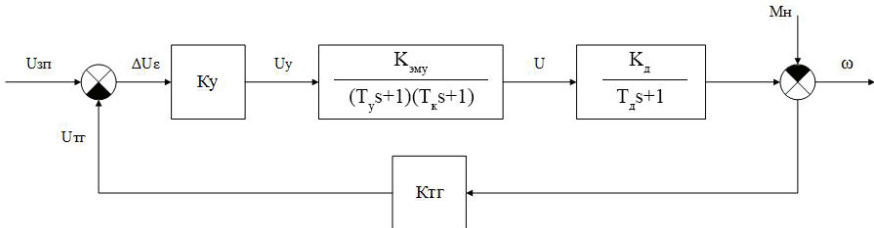


Рис. 3. Структурная схема САУ скоростью вращения ДПТ с обратной связью

Схема, приведённая на рис. 3, имеет в цепи обратной связи пропорциональное звено, соответствующее тахогенератору. Поэтому данная схема называется схема САУ с П-регулятором.

2.3. Определение точности работы системы

Определим точность работы системы в установившемся режиме. Для этого необходимо найти значение ошибки $\Delta U_{\varepsilon \text{уст}}$ по управляющему воздействию. Выражение для $\Delta U_{\varepsilon \text{уст}}$ находится по изображению ошибки в преобразованиях Лапласа:

$$\Delta U_{\varepsilon \text{уст}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta U_{\varepsilon}(t) = \Delta U_{\varepsilon}(\infty), \quad (10)$$

где $U_{\varepsilon \text{уст}}$ – установившееся значение ошибки, В;

U_{ε} – разность напряжений потенциометра и тахогенератора, В.

Теперь найдём связь между $\Delta U_{\varepsilon}(\infty)$ и $\Delta U_{\varepsilon}(s)$, где $\Delta U_{\varepsilon}(s) \div \Delta U_{\varepsilon}(t)$.

Согласно преобразованию Лапласа можно записать:

$$\int_0^{\infty} e^{-st} d\Delta U_{\varepsilon}(t) = s\Delta U_{\varepsilon}(s) - \Delta U_{\varepsilon}(0). \quad (11)$$

Устремим s в правой и левой частях равенства к нулю, тогда предел будет стремиться к единице $\lim_{s \rightarrow 0} e^{-st} \Rightarrow 1$. Получим:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \int_0^{\infty} e^{-st} d\Delta U_{\varepsilon}(t) = \Delta U_{\varepsilon}(\infty) - \Delta U_{\varepsilon}(0). \quad (12)$$

Тогда:

$$\Delta U_{\varepsilon}(\infty) - \Delta U_{\varepsilon}(0) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta U_{\varepsilon}(s) - \Delta U_{\varepsilon}(0), \quad (13)$$

$$\Delta U_{\varepsilon}(\infty) = \lim_{t \rightarrow 0} \Delta U_{\varepsilon}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta U_{\varepsilon}(s). \quad (14)$$

Из выражения (14) можно сделать вывод: чтобы найти установившееся значение функции $\Delta U_{\varepsilon}(t)$ нужно её изображение в преобразованиях Лапласа умножить на s и устремить к нулю. Ошибку $\Delta U_{\varepsilon}(s)$ можно определить на основе передаточной функции по ошибке относительно управляющего воздействия, которая имеет вид:

$$W_{\varepsilon}(s) = \frac{1}{1 + W_{\text{раз}}(s)}, \quad (15)$$

где $W_{\varepsilon}(s)$ – передаточная функция по ошибке;

$W_{\text{раз}}(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы.

Так как

$$\Delta U_{\varepsilon}(s) = \frac{1}{1 + W_{\text{раз}}(s)} U_{\text{зн}}(s), \quad (16)$$

где U_{ε} – разность напряжений потенциометра и тахогенератора, В;

$W_{\text{раз}}(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы,
 $U_{\text{зп}}$ – напряжение с задающего потенциометра, В.

То

$$\Delta U_{\varepsilon \text{ уст}}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{U_{\text{зп}}(s)}{1 + W_{\text{раз}}(s)}. \quad (17)$$

В нашем случае

$$\lim_{s \rightarrow 0} W_{\text{раз}}(s) = K_p, \quad (18)$$

где $K_p = K_y \cdot K_{\text{эму}} \cdot K_d$ – передаточный коэффициент разомкнутой цепи.

Единичное ступенчатое воздействие во временной области и в преобразовании Лапласа запишется в виде:

$$U_{\text{зп}}(t) = \frac{1}{U_{\text{зп}}(s)} = \frac{1}{s}, \quad (19)$$

Тогда ошибка регулирования в установившемся режиме будет иметь величину:

$$\Delta U_{\varepsilon \text{ уст}}(s) = \frac{1}{1 + K_p}. \quad (20)$$

Как видно из выражения (20) схема работает с ошибкой, то есть при увеличении нагрузки скорость двигателя снижается и через некоторое время принимает новое установившееся значение отличное от изначального. Такие системы, у которых установившееся значение ошибки равно какому-либо значению отличному от нуля при наличии постоянных управляющих и возмущающих воздействий, называют статические. Системы, у которых величина ошибки равна нулю, то есть ошибка отсутствует, называются астатическими. Очевидно, что для систем автоматического управления желательно, чтобы ошибка равнялась нулю, и система была астатической.

Выражение (20) определяет статизм системы. Из этого выражения видно, что статизм системы можно уменьшить, а значит увеличить устойчивость системы. Для этого необходимо увеличивать передаточный коэффициент разомкнутой САУ. Однако неограниченно увеличивать передаточный коэффициент нельзя, так как это наоборот приведёт к потере устойчивости системы.

2.4. Схема САУ с комбинированным управлением

Как было рассмотрено выше, для повышения устойчивости системы нужно увеличивать один или несколько передаточных коэффициентов. Однако это не очень удобно. Для уменьшения величины статизма, то есть для повышения точности регулирования, в системе предусмотрена возможность воздействия не только по отклонению регулируемой величины, но и по возмущению, то есть по моменту нагрузки M_n . Такой способ называется комбинированным управлением. Принципиальная схема САУ с комбинированным управлением или с компаундированием приведена на рис. 4.

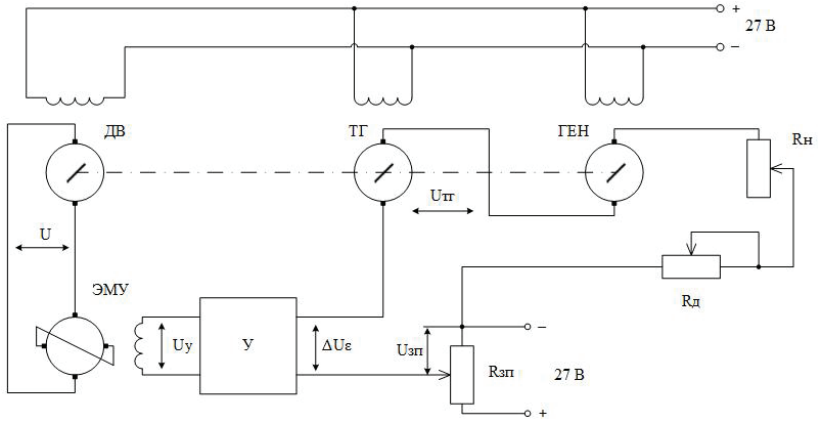


Рис. 4. Принципиальная схема САУ скоростью вращения двигателя с комбинированным управлением

В отличие от ранее рассматриваемой схемы здесь генератор включён последовательно в цепь с тахогенератором. Теперь помимо реостата нагрузки R_n в схеме используется регулируемое сопротивление R_d , падение напряжение на котором равно $U_{\text{комб}}$. Это напряжение суммируется с разностью напряжений задающего потенциометра и тахогенератора и подаётся на вход усилителя. Тогда напряжение на входе усилителя будет равно:

$$\Delta U_{\varepsilon} = U_{\text{зп}} - U_{\text{тг}} + U_{\text{комб}}, \quad (21)$$

где ΔU_{ε} – разность напряжений, В;

$U_{\text{зп}}$ – напряжение с задающего потенциометра, В;

$U_{\text{тг}}$ – напряжение тахогенератора, В;

$U_{\text{комб}}$ – напряжение с потенциометра R_d , В.

Структурная схема САУ с комбинированным управлением приведена на рис. 5.

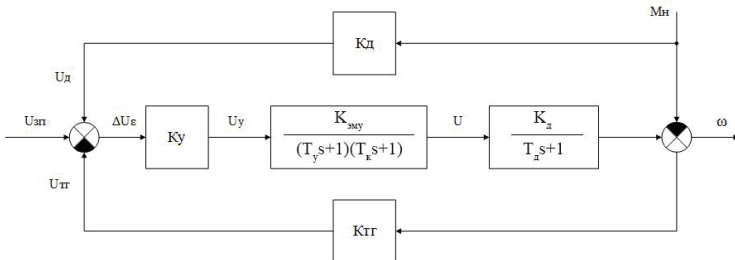


Рис. 5. Структурная схема САУ с комбинированным управлением

2.5. Схема САУ с дифференцирующим звеном

Однако качество стабилизации схемы можно повысить и другими способами. Рассмотрим два способа: применение в цепях обратной связи дифференцирующего или интегрирующего звена.

Если параллельно с введением сигнала ошибки ΔU_ε ввести сигнал, пропорциональный его производной $s\Delta U_\varepsilon$, то напряжение на выходе усилителя будет равно:

$$U_y = K_y[\Delta U_\varepsilon(s) + s\Delta U_\varepsilon(s)], \quad (22)$$

где U_y – напряжение на выходе усилителя, В;

K_y – передаточный коэффициент усилителя;

ΔU_ε – напряжение на входе усилителя, В.

Структурная схема САУ скоростью вращения двигателя с введением производной сигнала ошибки приведена на рис. 6.

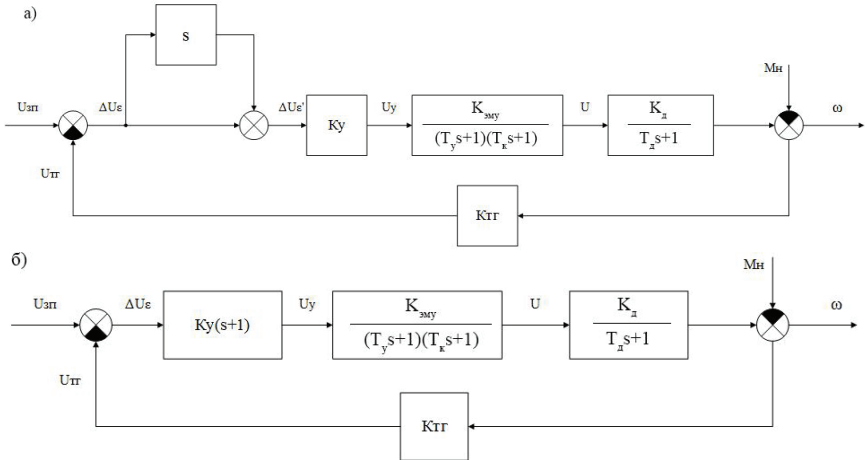


Рис. 6. Структурная схема САУ скоростью вращения двигателя с введением производной сигнала ошибки

Данная схема содержит как пропорциональное, так и дифференциальное звено, поэтому такую схему называют схема с ПД-регулятором.

Передаточная функция разомкнутой системы запишется в виде:

$$W_1(s) = \frac{K_p + K_p s}{(T_y s + 1)(T_k s + 1)(T_d s + 1)}, \quad (23)$$

где $K_p = K_y \cdot K_{эмy} \cdot K_d$ – передаточный коэффициент разомкнутой цепи;

T_y – постоянная времени цепи обмотки управления, с;

T_k – постоянная времени короткозамкнутой цепи, с;

T_d – постоянная времени двигателя, с.

Тогда передаточная функция по ошибке будет иметь вид:

$$W_{\text{дифф}}(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_p + K_p s}{(T_y s + 1)(T_k s + 1)(T_d s + 1)}}. \quad (24)$$

Установившееся значение ошибки для системы с введением дифференциального звена будет определяться как:

$$\Delta U_{\text{дифф}} = \lim_{s \rightarrow 0} s W_{\text{дифф}}(s) \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{1 + K_p}. \quad (25)$$

Сравнивая выражения (20) и (25) видно, что введение в цепь производной по сигналу ошибки не влияет на величину установившейся ошибки. Однако введение дифференцирующего звена увеличивает запас устойчивости системы, оказывая демпфирующее воздействие и уменьшая колебательность. А это значит, что коэффициент усиления K_p можно увеличить на большее значение, тем самым снизив статическую ошибку.

2.6. Схема САУ с интегрирующим звеном

Другой эффект мы получим если параллельно с введением сигнала ошибки введём сигнал, пропорциональный его интегралу. Напряжение на выходе усилителя в данном случае будет равно:

$$U_y = K_y \left[\Delta U_\varepsilon(s) + \frac{1}{s} \Delta U_\varepsilon(s) \right], \quad (26)$$

где U_y – напряжение на выходе усилителя, В;

K_y – передаточный коэффициент усилителя;

ΔU_ε – напряжение на входе усилителя, В.

Структурная схема САУ скоростью вращения двигателя с введением интеграла сигнала ошибки приведена на рис. 7.

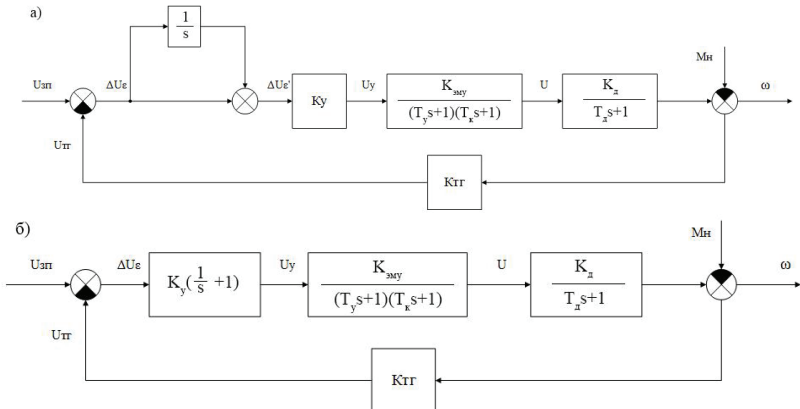


Рис. 7. Структурная схема САУ скоростью вращения двигателя с введением интеграла сигнала ошибки

Данная схема содержит в цепи пропорциональное и интегрирующее звено. Такая схема называется схема с ПИ-регулятором.

В этом случае передаточная функция разомкнутой системы примет вид:

$$W_{p2}(s) = \frac{K_p + \frac{K_p}{s}}{(T_y s + 1)(T_k s + 1)(T_d s + 1)}, \quad (27)$$

где $K_p = K_y \cdot K_{эмy} \cdot K_d$ – передаточный коэффициент разомкнутой цепи;

T_y – постоянная времени цепи обмотки управления, с;

T_k – постоянная времени короткозамкнутой цепи, с;

T_d – постоянная времени двигателя, с.

А передаточная функция по ошибке будет иметь вид:

$$W_{инт}(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_p + K_p/s}{(T_y s + 1)(T_k s + 1)(T_d s + 1)}}. \quad (28)$$

Установившееся значение ошибки для системы с введением интегрирующего звена будет определяться как:

$$\Delta U_{инт} = \lim_{s \rightarrow 0} s W_{инт}(s) \cdot \frac{1}{s} = 0. \quad (29)$$

Из выражения (29) видно, что введение в цепь интеграла от сигнала ошибки оказывает существенно влияния на величину ошибки. Она становится равной нулю. Следовательно, включение в цепь интегрирующего звена превращает систему из статической в астатическую. Однако увеличивается время переходного процесса, а при дальнейшем увеличении передаточного коэффициента интегратора $K_{инт}$ будет возрастать колебательность системы.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

3.1. Модель схемы в программе SimInTech

Для данной модели САУ скоростью вращения двигателя предоставляется два файла, которые могут быть открыты в программе SimInTech. В файле “САУ ДПТ” представлена основная имитационная модель, с помощью которой производится выполнение экспериментальной части. Вторым файлом, который называется “САУ ДПТ – сравнение” содержит две одинаковые модели двигателя, аналогичных основной модели. Этот файл создан для удобства экспериментатора. В нём путём сравнения можно наглядно увидеть, как влияют различные параметры схемы на переходные процессы. Описанный далее алгоритм выполнения эксперимента аналогичен для обоих файлов.

После открытия файла модели на экране появится рабочее окно проекта (рис. 8). Рабочее окно можно разделить на рабочую зону проекта, где непосред-

ственно содержится модель двигателя, и панель управления, откуда активируются, например, такие функции как запуск модели на расчёт.

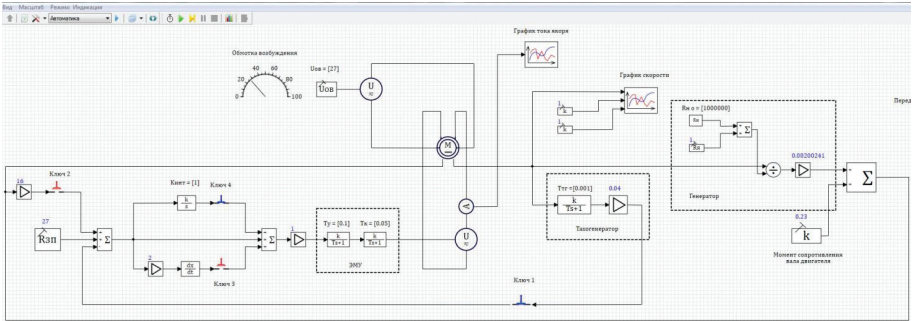


Рис. 8. Рабочее окно проекта в программе SimInTech

Более детально разберем, из каких элементов состоит данная модель:

1. Объект регулирования – двигатель постоянного тока представлен в виде блока, приведённого на рис. 9. В модели реализовано независимое возбуждение с одной обмоткой возбуждения.

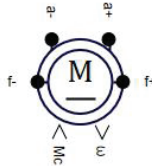


Рис. 9. Модель двигатель постоянного тока

Блок имеет 5 входных портов и 1 выходной. Порты “+ a” и “– a” предназначены для подачи напряжения питания на обмотку якоря. Через порты “+ f” и “– f” подаётся питание на обмотку возбуждения. Порт “Mc” служит для подачи момента сопротивления к валу двигателя. Порт “ ω ” является выходным, с него снимается скорость вращения вала двигателя. Технические характеристики двигателя приведены в Приложении 1.

Так же в модели учитывается момент сопротивления, создаваемый валом электродвигателя (рис. 8). Это сопротивление равно $0,23 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Оно реализовано с помощью блока константы.

2. Тахогенератор представлен в виде двух звеньев: аperiodического звена первого порядка и усилительного звена (рис. 10). Как говорилось ранее, передаточная функция тахогенератора в основном является звеном усилительным. Однако в данной модели учитываются инерционные свойства машины, поэтому в схему было включено аperiodическое звено. Не смотря на это, постоянная

времени тахогенератора $T_{ТГ}$ определяется небольшим значением и не оказывает существенного влияния на схему.

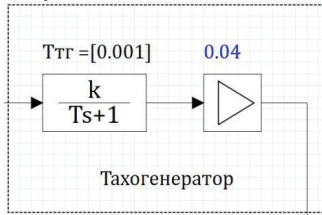


Рис. 10. Модель тахогенератора

3. Электромашинный усилитель мощности ЭМУ представлен в виде двух апериодических звеньев первого порядка (рис. 11) в соответствии с передаточной функцией ЭМУ (9).

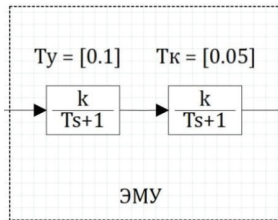


Рис. 11. Модель ЭМУ

4. Задающий потенциометр реализован в виде блока константы с возможностью изменения постоянного значения (рис. 12). Таким образом, значение константы соответствует напряжению, подаваемому в систему. В данной модели величина напряжения равняется 27 В.

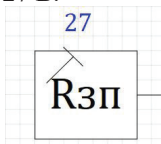


Рис. 12. Модель задающего потенциометра $R_{зп}$

5. Блоки, реализующие принцип работы генератора как нагрузки, приведены на рис. 13.

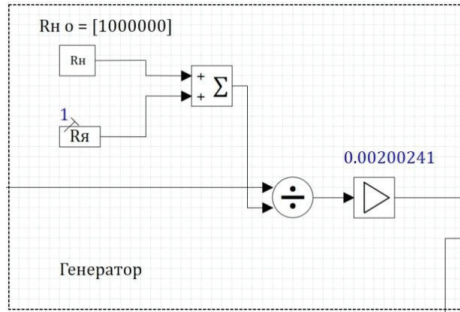


Рис. 13. Модель генератора

Электромагнитный момент, создаваемый генератором можно записать как:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{C_m C_e \Phi_B^2 \omega}{R_H + R_Y}, \quad (30)$$

где $M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент, Н·м; C_m, C_e – коэффициенты, зависящие от конструкции ЭМ; Φ_B – магнитный поток возбуждения, Вб; ω – скорость вращения вала, рад/с; R_H – сопротивление нагрузки, Ом; R_Y – сопротивление цепи якоря, Ом.

Из выражения (30) видно, что изменяя сопротивление нагрузки R_H можно изменять электромагнитный момент $M_{\text{ЭМ}}$.

В модели генератора реализована следующая логика. Блок R_H (рис. 13) представляет собой элемент ступенька. Данный блок выдаёт постоянный сигнал равный начальному условию. Через определённое время этот сигнал скачком изменяется на другое значение, соответствующее конечному значению. Блок R_Y является константой и соответствует сопротивлению цепи якоря. Сопротивление нагрузки и цепи якоря складываются, согласно выражению (30). Далее полученная сумма поступает на вход знаменателя блока деления. На вход числителя подаётся скорость вращения вала. После операции деления полученный сигнал, соответствующий электромагнитному моменту, через усилитель подаётся на вход двигателя для момента сопротивления “ M_C ”. Так в схеме реализована работа генератора.

Список всех блоков и значения соответствующих параметров приведены в таблице 7.1 в Приложении 1.

3.2. Общие указания по работе с программой

Перед тем, как запустить программу на расчёт пользователь может задавать желаемые значения переменных у блоков. Для того чтобы поменять какой-либо параметр необходимо вызвать контекстное меню свойств блока. Это можно сделать либо двойным нажатием левой кнопки мыши по блоку, параметр ко-

того необходимо изменить, либо одиночным нажатием правой кнопки мыши по блоку с последующим выбором пункта “Свойства объекта” в открывшемся меню. После этого откроется меню свойств объекта, которые можно изменять. Значение переменных необходимо записывать в столбец “Значение”. После внесённых изменений нужно закрыть окно свойств объекта, нажатием на значок закрытия.

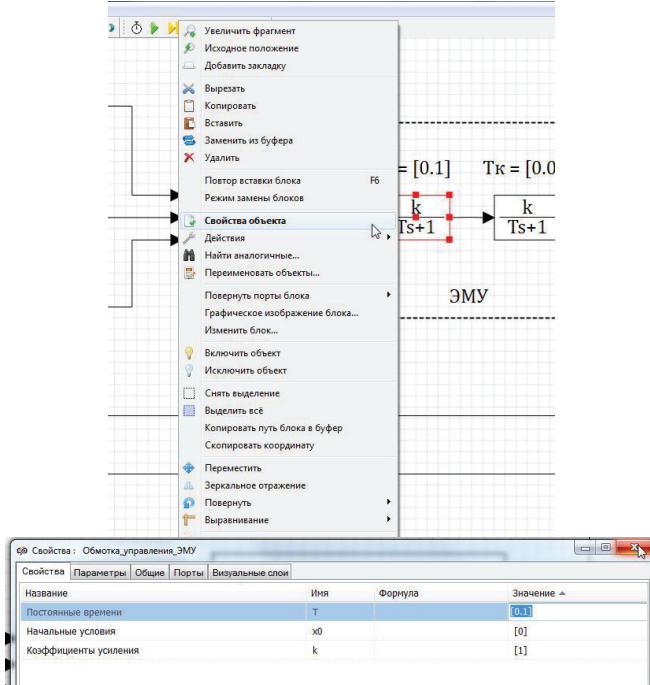


Рис. 9. Изменение переменных блока

Стоит заметить, что для некоторых блоков на схеме предусмотрено управление от стрелочного прибора (рис. 10). Этот прибор имитирует потенциометр. С помощью этих потенциометров значение коэффициентов блоков возможно изменять непосредственно во время расчёта схемы, то есть в реальном времени.



Рис. 10. Блок задающего потенциометра

Если не предполагается управление схемой в реальном времени с помощью потенциометров этот пункт можно пропустить. Изначально схема производит расчёт в ускоренном режиме, поэтому пользователь попросту не успеет управлять блоком с помощью потенциометра. Для того чтобы это было возможно необходимо внести изменения в параметры расчёта схемы. Для этого надо вызвать меню настройки параметров расчёта схемы путём нажатия на значок “Параметры расчёта” на панели управления моделью – значок скрещенных молотка и отвёртки. Далее необходимо перейти во вкладку “Синхронизация” и активировать пункт “Синхронизировать с реальным временем” (рис. 11). Теперь расчёт будет производиться, как следует из названия, постепенно с реальным временем. Также во вкладке “Параметры расчёта” есть пункт “Конечное время расчёта”. Здесь задаётся время, до которого будет производиться расчёт.

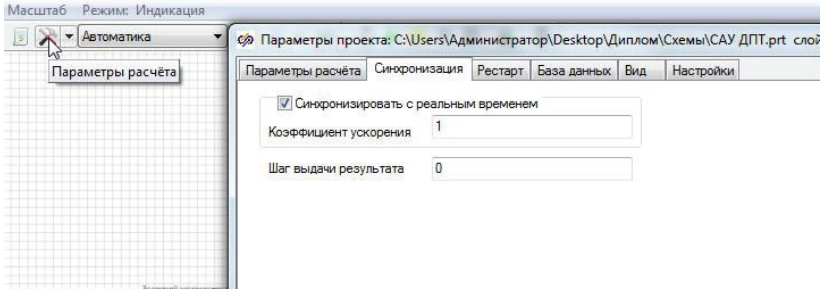


Рис. 11. Настройка параметров расчёта схемы

Теперь двойным нажатием левой кнопки мыши можно открыть блок, который будет строить график скорости двигателя (рис. 12). Также в модели предусмотрена возможность построить график тока якоря двигателя. Однако пользователь может сам выбирать для какого сигнала строить график, путём добавления в модель блока “Временной график” и подключением его к соответствующей линии связи.

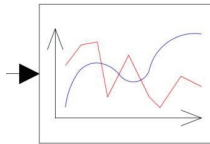


Рис. 12. Изображение блока “Временной график”

Перед тем как запустить схему на расчёт её нужно инициализировать, то есть привести в какое-то начальное состояние. Для этого необходимо нажать на значок секундомера на панели управления. После этого фон в рабочей области должен стать белым, а пользователю станут доступны для управления потенциометры блоков и ключи (рис 13). С помощью ключей возможно изменять

конфигурацию схемы, подключая или отключая её различные участки. Управление ключами производится путём единичного нажатия на них левой кнопкой мыши.



Рис. 13. Ручной ключ в замкнутом (а) и разомкнутом (б) положении

Если фон проекта не изменился, то необходимо перевести модель из режима “Редактирование” в режим “Индикация”. Определить в каком режиме сейчас находится схема, можно по надписи на панели управления. Там же находится кнопка изменяющая режимы. Режиму редактирования соответствует иконка синей стрелочки с вертикальной линией, режиму индикации соответствует иконка только с синей стрелочкой (рис. 14). Для перевода схемы из одного режима в другой нужно нажать один раз левой кнопкой мыши по иконке.

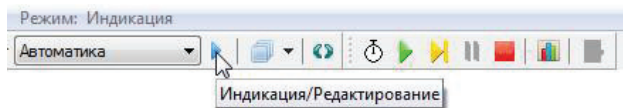


Рис. 14. Изменение режима схемы

После инициализации схема полностью готова к расчёту. Для запуска расчёта необходимо нажать на значок зелёной стрелки на панели управления (рис. 14). Также предусмотрена возможность произвести расчёт по шагам, путём нажатия на значок жёлтой стрелки. Расчёт схемы можно поставить на паузу или остановить. После расчёта будет построен график, а переменные блоков снова станут доступны для изменения.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Схема САУ с управляющим воздействием от задающего потенциометра

Произвести моделирование схемы САУ скоростью вращения ДПТ с управляющим воздействием от задающего потенциометра, снять переходные процессы для скорости вращения двигателя и тока якоря, определить показатели качества переходного процесса для скорости вращения двигателя.

Перед выполнением эксперимента убедитесь, что “Ключ 1” находится в замкнутом состоянии, “Ключ 2”, “Ключ 3”, “Ключ 4” – в разомкнутом. Параметры всех блоков соответствуют, приведённым в Приложении 1. Произведите

расчёт схемы. Определите показатели переходного процесса, приведённые в таблице 4.1.

Время регулирования или время переходного процесса t_p – это время, по истечению которого отклонение выходного сигнала не будет превышать допустимых пределов. Другими словами время регулирования – это время, за которое переходный процесс войдёт в 5% трубку и больше не будет покидать её.

В нашем случае можно условно разделить весь переходный процесс на два. Первый – вначале, когда двигатель только раскручивается, второй – при подключении нагрузки. Поэтому целесообразно указать время регулирования для двух вариантов. Для построения на графике переходного процесса линий, соответствующих 5% трубке, в схеме предусмотрены два блока константы. После введения максимального и минимального значений отклонений схему необходимо ещё раз запустить на расчёт.

Перерегулирование $\sigma\%$ – это величина равная отношению максимального отклонения регулируемой величины от её установившегося значения к установившемуся значению, выраженная в процентах. Перерегулирование определяется следующей формулой:

$$\sigma\% = \left(\frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \right) \cdot 100\%, \quad (31)$$

где $\sigma\%$ - величина перерегулирования, %;

y_{max} – максимальное значение регулируемой величины, рад/с;

y_{∞} – установившееся значение регулируемой величины, рад/с.

Сделайте вывод о работе схемы.

4.2. Схема САУ с комбинированным управлением

Произвести моделирование схемы САУ скоростью вращения ДПТ с комбинированным управлением, снять переходные процессы для скорости вращения двигателя и тока якоря, определить показатели качества переходного процесса для скорости вращения двигателя.

Перед выполнением эксперимента убедитесь, что “Ключ 1” и “Ключ 2” находится в замкнутом состоянии, “Ключ 3”, “Ключ 4” – в разомкнутом. Параметры всех блоков соответствуют, приведённым в Приложении 1. Произведите расчёт схемы. Определите показатели переходного процесса, приведённые в таблице 4.1.

Сделайте вывод о работе схемы.

4.3. Схема САУ с дифференцирующим звеном

Произвести моделирование схемы САУ скоростью вращения ДПТ с дифференцирующим звеном, снять переходные процессы для скорости вращения двигателя и тока якоря, определить показатели качества переходного процесса для скорости вращения двигателя.

Перед выполнением эксперимента убедитесь, что “Ключ 1” и “Ключ 3” находятся в замкнутом состоянии, “Ключ 2”, “Ключ 4” – в разомкнутом. Параметры всех блоков соответствуют, приведённым в Приложении 1. Произведите расчёт схемы. Определите показатели переходного процесса, приведённые в таблице 4.1.

Сделайте вывод о работе схемы.

4.4. Схема САУ с интегрирующим звеном

Произвести моделирование схемы САУ скоростью вращения ДПТ с интегрирующим звеном, снять переходные процессы для скорости вращения двигателя и тока якоря, определить показатели качества переходного процесса для скорости вращения двигателя.

Перед выполнением эксперимента убедитесь, что “Ключ 1” и “Ключ 4” находится в замкнутом состоянии, “Ключ 2”, “Ключ 3” – в разомкнутом. Параметры всех блоков соответствуют, приведённым в Приложении 1. Произведите расчёт схемы. Определите показатели переходного процесса, приведённые в таблице 4.1.

Сделайте вывод о работе схемы.

Таблица 4.1

Параметр	R_{zn}	Комб	Дифф	Инт
Установившееся значение u_{∞} , рад/с				
Отклонение от установившегося значения Δ , рад/с				
Максимальное значение регулируемой величины u_{max} , рад/с				
Время достижения максимального значения t_{max} , с				
Минимальное значение регулируемой величины u_{min} , рад/с				
Время достижения минимального значения t_{min} , с				
Время регулирования t_p , с Вначале При подключении нагрузки				
Перерегулирование $\sigma_{\%}$				

5. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- Структурные схемы САУ скорости вращения двигателя и краткая теория о работе;
- Графики переходных процессов для скорости вращения двигателя и тока якоря;
- Таблицу экспериментальных данных;
- Анализ полученных результатов и выводы.

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие бывают способы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока?
2. Напишите выражение для определения скорости вращения двигателя.
3. Как работает схема САУ с управляющим воздействием от задающего потенциометра?
4. Что является характерной особенностью электромашинного усилителя? Как называются такие усилители?
5. Определите передаточную функцию замкнутой САУ с управляющим воздействием от задающего потенциометра.
6. Дайте определение для статической и астатической САУ?
7. Как введение дифференцирующего и интегрирующего звена влияет на величину ошибки регулирования?

Приложение 1

Таблица 7.1

Блок	Обозначение	Значение
Двигатель постоянного тока		
1. Тип двигателя	TYPE	Д-180
2. Номинальное напряжение обмотки якоря, В	U _{номa}	27
3. Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	U _{номf}	27
4. Номинальная частота вращения, об/мин	N _{ном}	7500
5. Номинальная мощность, Вт	P _{ном}	180
6. Момент инерции, кг·м ²	J	0,0015
7. Доля механических потерь, %	P _{лос}	13
8. Параметры обмотки якоря:		
Активное сопротивление, Ом	R _я	0,47144
Индуктивность, Гн	L _я	0,001157
9. Параметры обмотки возбуждения:		
Активное сопротивление, Ом	R _в	45
Индуктивность, Гн	L _в	0,441
10. Коэффициент связи обмоток	K _{af}	0,04837
11. Коэффициент усиления	K _д	29
12. Постоянная времени, с	T _д	0,84
13. Момент сопротивления на валу, Н·м	M _{св}	0,23
Генератор постоянного тока		
1. Начальное состояние, Ом	y ₀	1000000
2. Конечное состояние, Ом	y _к	1
3. Время срабатывания, с	t	20
4. Сопротивление цепи якоря, Ом	R _я	1
5. Передаточный коэффициент	K _{ген}	0,001
Тахогенератор		
1. Передаточный коэффициент	K _{тг}	0,04
2. Постоянная времени, с	T _{тг}	0,001
ЭМУ		
1. Передаточный коэффициент	K _{эму}	1
2. Постоянная времени цепи обмотки управления, с	T _у	0,1
3. Постоянная времени короткозамкнутой обмотки, с	T _к	0,05
Передаточный коэффициент производной	K _{дифф}	2
Передаточный коэффициент интеграла	K _{инт}	1
Передаточный коэффициент усилителя	K _у	1

Литература

1. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1985.
2. Теория автоматического управления: ч. 1, ч. 2; Под ред. Акад. А. А. Воронова. М.: Высшая школа, 1986.
3. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М.: Машиностроение, 1978.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	3
2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	3
2.1 СХЕМА САУ СОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ДПТ	3
2.2. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САУ	6
2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ	8
2.4. СХЕМА САУ С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	9
2.5. СХЕМА САУ С ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИМ ЗВЕНОМ	11
2.6. СХЕМА САУ С ИНТЕГРИРУЮЩИМ ЗВЕНОМ	12
3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	13
3.1. МОДЕЛЬ СХЕМЫ В ПРОГРАММЕ SIMINTECH	13
3.2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ	16
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	19
5. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОТЧЁТЫ	22
6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	23
Литература	24