

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ПРИМЕНЕНИЕ ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В ТРЕХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Цели работы

- Изучение структуры и регулирующих устройств автоматической системы каскадного типа (на примере электропривода)
- Настройка контура тока электропривода на технический оптимум
- Настройка контура скорости электропривода на технический и симметричный оптимумы
- Настройка контура положения электропривода
- Освоение пакета *Matlab+Simulink* (другого программного обеспечения), предназначенного для моделирования автоматических систем

2. Вопросы для подготовки к работе

Каковы характерные особенности системы подчиненного регулирования?

Чем определяется быстродействие силового преобразователя электропривода?

Какие типовые регуляторы применяют в электроприводе? Как записать их передаточные функции (ПФ)?

Как выполняют настройку регулятора на технический оптимум? На симметричный оптимум?

3. Основные определения и соотношения

3.1. Представление электропривода в виде системы подчиненного регулирования

Начальные сведения об автоматизированном электроприводе можно найти в [1], с.117. силовой преобразователь описан там же нас.121-122. Простые структуры электропривода не позволяют обеспечить качество работы механизмов.

С целью улучшения статических и динамических характеристик электропривода в системах следящего электропривода применяется система подчиненного регулирования (СПР), которая является многоконтурной системой с каскадным включением регуляторов. Число регуляторов и контуров равно числу регулируемых параметров. Основными преимуществами этой типовой структуры являются: возможность применения простых типовых регуляторов, настройка регуляторов происходит последовательно, начиная с внутреннего контура, при этом результат настройки легко проверяется, расчет коэффициентов типовых регуляторов проводится по формулам и на основе

экспериментально определенных свойств объекта, максимальное значение каждой регулируемой переменной легко может быть ограничено.

Применительно к **регулируемому** электроприводу, выполненному на высокомоментном двигателе постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, система подчинённого регулирования будет содержать два контура: тока и скорости. В **сервоприводе** подачи добавится контур положения (рис.1). Если рассматривается привод **главного движения**, то появляются ещё 1 – 2 регулятора контура возбуждения.

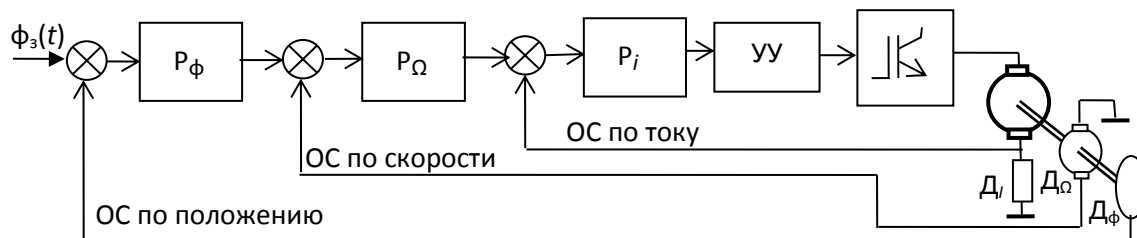


Рис.1. Функциональная схема электропривода с обратными связями по току, скорости вращения и положению

Система подчиненного регулирования представляет собой многоконтурную структуру с обратной связью по положению ротора ϕ , частоте вращения n и току якоря i_a . Соответствующие сигналы обратной связи формируются резистивным датчиком тока D_i , тахогенератором в качестве датчика скорости вращения D_Ω и оптоэлектронным датчиком положения - угла поворота D_ϕ . Особенность структуры заключается в применении индивидуального регулятора (P_ϕ , P_Ω , P_i) для каждой величины. При этом контуры вложены один в другой, и параметры внутренних контуров подчинены задачам управления, решаемым внешними контурами.

В системе подчинённого регулирования применяют как релейные, так и типовые регуляторы (пропорциональные, пропорционально – интегральные, пропорционально – интегрально – дифференциальные [1], с. 151, 159) и стандартные настройки этих регуляторов. Таких настроек две – **технический оптимум (ТО)**, который часто называют модульным оптимумом (МО) или оптимумом по модулю (ОМ), и **симметричный оптимум (СО)**. Современный электропривод, как правило, содержит адаптивные релейно - цифровые регулирующие устройства в сочетании с моделями частей электродвигателя и механической системы (адаптивными наблюдателями). Начинать изучение такой сложной автоматической системы нужно с её линейной непрерывной модели (рис.2).

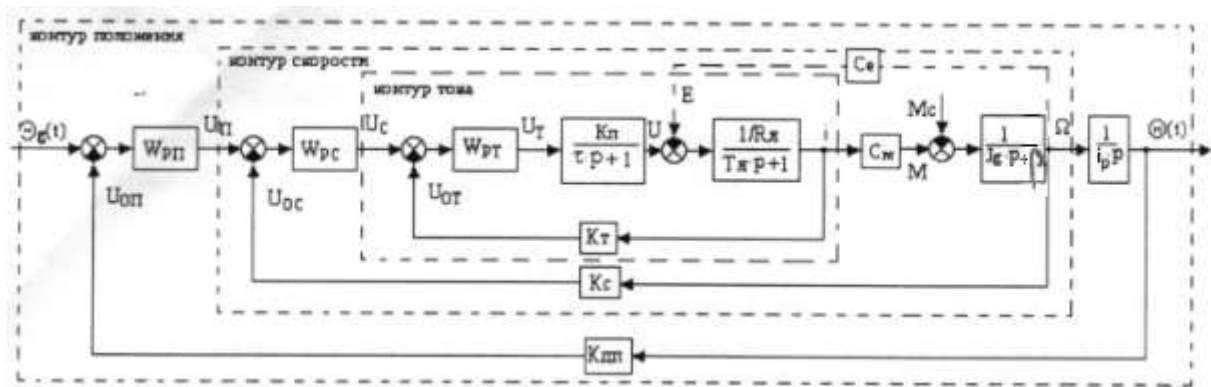


Рис.2 Структурная схема трёхконтурной системы подчиненного регулирования электропривода постоянного тока

- $W_{рп}$ – передаточная функция регулятора положения;
 $W_{рс}$ – передаточная функция регулятора скорости;
 $W_{рт}$ – передаточная функция регулятора тока;
 $K_{п}$ – коэффициент передачи силового преобразователя;
 τ – постоянная времени силового преобразователя;
 $K_{т}$ – коэффициент передачи датчика тока;
 $K_{с}$ – коэффициент передачи датчика скорости;
 $K_{дп}$ – коэффициент передачи датчика положения;
 $C_e = C_m = C$ – конструктивные постоянные электродвигателя;
 $R_{я}$ – сопротивление ротора электродвигателя;
 $T_{я}$ – электромагнитная постоянная времени электродвигателя;
 Θ_g – задающее воздействие;
 Θ – угол поворота вала двигателя
 M – электромагнитный момент электродвигателя;
 M_c – момент сопротивления (моделирует работу, выполняемую рабочим механизмом электропривода);
 J_g – суммарный момент инерции механической системы электропривода;
 Ω – угловая скорость вала электродвигателя;
 i – ток электродвигателя;
 i_p – коэффициент передачи редуктора.
 E – противо-ЭДС вращения электродвигателя;
 $U_{оп}, U_{ос}, U_{от}$ – сигналы на выходе регуляторов;
 $U_{оп}, U_{ос}, U_{от}$ – сигнал обратной связи на выходе соответствующего датчика

3.2 Настройка контура тока на технический оптимум

Контур тока состоит из электрической части двигателя (W_{Δ}), силового преобразователя (W_{γ}), регулятора тока (P_i) (прямая цепь) и обратной связи, образованной информационно - измерительной системой датчика тока (K_T) (рис.3). Для настройки контура тока можно пренебречь внутренней обратной связью по противо-ЭДС электродвигателя (E). В качестве регулятора тока в

линейном случае применяют пропорционально – интегральный (ПИ-) регулятор.

Для настройки контура тока на ТО необходимо рассчитать параметры регулятора по формулам (2) и (3) и потом реализовать их.

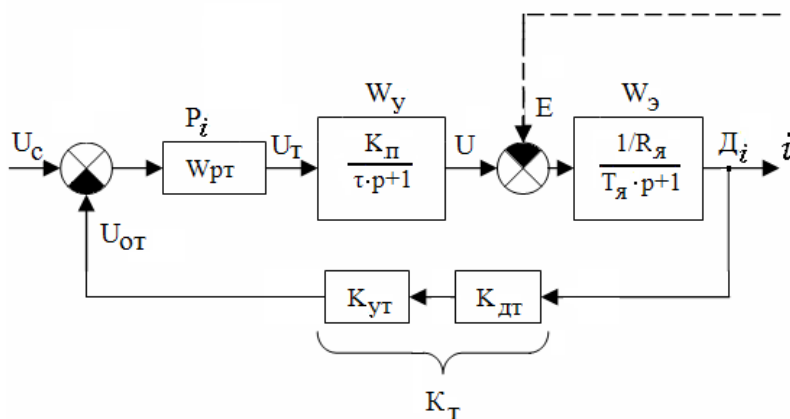


Рис.3. Структурная схема контура тока

Настройка на технический оптимум придаёт (при справедливости определённых предположений) контуру тока динамические свойства, близкие к свойствам колебательного (4) или инерционного (5) звеньев с удвоенной малой постоянной времени, которой в контуре тока является постоянная времени τ силового преобразователя. Более конкретно, настройка КТ на ТО характеризуется небольшим перерегулированием (меньше 5%) и длительностью переходного процесса, приблизительно равной 5τ .

Здесь Кдт – коэффициент передачи чувствительного элемента (сенсора) датчика тока, Кут – коэффициент усилителя сигнала сенсора датчика тока (подбирая его, можно влиять на общий коэффициент передачи контура тока).

В качестве регулятора тока применяют пропорционально – интегральный (ПИ-) регулятор (например, на операционных усилителях) с передаточной функцией ([2], с.140):

$$W_{PT}(p) = K_{PT} \cdot \frac{1 + T_{PT} \cdot p}{T_{PT} \cdot p} . \quad (1)$$

Для настройки контура тока необходимо рассчитать параметры регулятора (K_{PT} и T_{PT}) таким образом, чтобы при подстановке их в передаточную функцию регулятора тока W_{PT} контур приобретал свойства соответствующего оптимума.

Стандартная настройка ПИ-регулятора контура тока эффективна, если

а) силовой преобразователь имеет достаточное быстродействие

($\tau \in [0.1, 0.2] \cdot T_{Я}$),

б) механические процессы в приводе протекают медленнее, чем электрические.

Должно выполняться условие ([2], с. 139):

$$T_M + \frac{T_J}{5} > 5 \cdot \tau$$

Проверим:

$$T_M + \frac{T_J}{5} = 0.017 + \frac{0.0145}{5} = 0.02 ;$$

$$5 \cdot \tau = 5 \cdot 0.0033 = 0.016$$

Условие выполняется. Причем при расчетах был взят только T_M двигателя, а с нагрузкой T_M будет еще больше. Если T_M неизвестно, считается, что настройка будет работать при $(\tau \in [0.1, 0.2] \cdot T_J)$.

Кут вычислим из следующих соображений: так как заранее известно, что при использовании ПИ-регулятора, настроенного на технический оптимум, перегулирование составляет $\approx 4\%$, при подаче на вход контура тока максимального напряжения в 10В ток в установившемся режиме должен быть равен номинальному току якоря двигателя, поэтому:

$$K_{UT} = \frac{10V}{K_{дт} \cdot I_J} = \frac{10}{0.013 \cdot 13.3} = 57.7,$$

Тогда

$$K_T = K_{UT} K_{дт} = 57.7 \cdot 0.013 = 0.57$$

Для настройки контура тока на технический оптимум необходимо ([2], с.140) постоянную времени регулятора тока T_{PT} реализовать равной электромагнитной постоянной времени T_J электрической части двигателя

$$T_{PT} = T_J = 0.0145 \text{ с}, \quad (2)$$

а коэффициент усиления регулятора тока K_{PT} рассчитать по формуле

$$K_{PT} = \frac{T_J \cdot R_J}{2 \cdot \tau \cdot K_{II} \cdot K_T} = \frac{0.0145 \cdot 0.968}{2 \cdot 0.00335 \cdot 21.5 \cdot 0.75} = 0.13. \quad (3)$$

Тогда передаточная функция регулятора тока будет иметь вид:

$$W_{PT}(p) = K_{PT} \cdot \frac{1 + T_{PT} \cdot p}{T_{PT} \cdot p} = 0.13 \cdot \frac{1 + 0.0145 \cdot p}{0.0145 \cdot p}$$

Необходимость применения ПИ-регулятора становится понятной, если обратить внимание, что числитель его передаточной функции при $T_{PT} = T_J$ компенсирует знаменатель W_{Σ} . Если параметры электрической части двигателя в процессе эксплуатации не соответствуют расчетным значениям (например, из-за нагрева сопротивление R_J может увеличиваться и это влияет как на коэффициент передачи, так и на постоянную времени ПФ W_{Σ}), то компенсация становится неполной и это приводит к отклонениям реальных характеристик контура от оценок, приводимых ниже.

Настройка на технический оптимум характеризуется небольшим перерегулированием (меньше 5%). Длительность переходного процесса определяется только постоянной времени силового преобразователя и приблизительно равна 5τ . Явно выраженных резонансных свойств оптимизированный контур тока не имеет, тем не менее, его передаточная функция может быть записана ([3], с. 91) через резонансную частоту $\omega_0 = 0.707/\tau$.

Таким образом, если настройка проведена верно, контур тока должен обладать ([2], с.141) динамическими свойствами, близкими к свойствам колебательного звена

$$W_{KT}(p) = \frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{2 \cdot \tau^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \tau \cdot p + 1}, \quad (4)$$

или (более грубая оценка) – инерционного звена 1-го порядка:

$$W_{KT}(p) = \frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{2\tau \cdot p + 1}. \quad (5)$$

Обратите внимание на то, что в действительности ПФ КТ имеет третий порядок. Понижение порядка до второго происходит теоретически при абсолютно точной компенсации, о которой говорилось выше. Представление КТ в виде инерционного звена используется при настройке внешних контуров. Поэтому рекомендуется запомнить, что (при справедливости всех предположений) **настройка на технический оптимум придает контуру тока динамические свойства, близкие к свойствам звена первого порядка с удвоенной малой постоянной времени.**

3.3 Настройка контура скорости на технический оптимум

Объектом регулирования в контуре скорости (КС) является оптимизированный контур тока и механика электропривода (рис. 4). Контур замыкается обратной связью по скорости вращения вала электродвигателя. Эта скорость обычно измеряется с помощью тахогенератора, встроенного в электродвигатель. В современных электроприводах она либо вычисляется дифференцированием сигнала датчика положения (исследования показывают, что отказ от применения тахогенератора приводит к уменьшению диапазона регулирования электропривода в два раза), либо (в бездатчиковых электроприводах) восстанавливается с помощью наблюдателя.

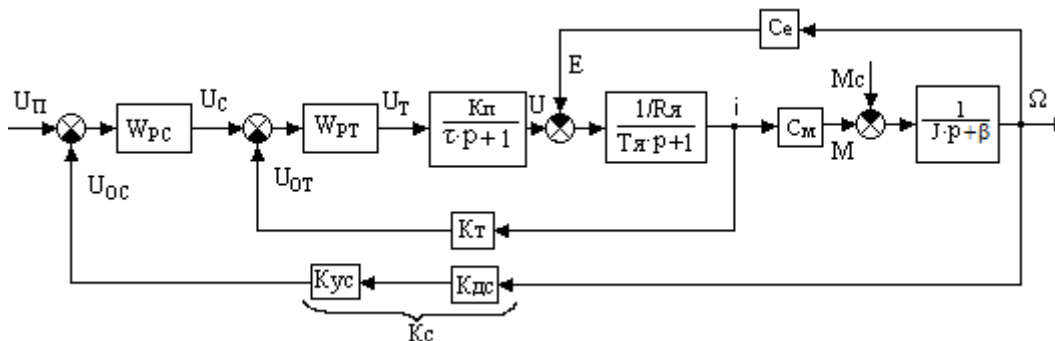


Рисунок 4 - Структурная схема контура скорости

+β

На рисунке 4 $K_{дс}$ – коэффициент передачи тахогенератора (сенсора), $K_{ус}$ – коэффициент усиления сигнала датчика скорости (подбирая его, можно влиять на общий коэффициент передачи контура скорости); $K_c = K_{ус} \cdot K_{дс}$ – общий коэффициент обратной связи по скорости.

Перед расчётом регулятора нужно также определить конструктивные постоянные c_e , c_m электродвигателя и электромеханическую постоянную времени T_m электропривода. Для так называемых высокомоментных электродвигателей $c_e = c_m = c$. Конструктивная постоянная c вычисляется по паспортным данным двигателя (делением номинального момента на номинальный ток). Электромеханическую постоянную времени (размерность – секунда) системы вычисляют по формуле, приведенной в [2] на с.19, заменяя момент инерции двигателя на суммарный момент инерции механической системы электропривода:

$$T_m = \frac{J \cdot R_{я}}{c^2} \quad (6)$$

Стандартные настройки контура скорости (в том числе – на ТО) будут осуществимы, если

а) реальный контур тока может быть заменён передаточной функцией (5),

б) выполняется условие ([2], с.139):

$$T_m + \frac{T_{я}}{5} > 5 \cdot \tau \quad (7)$$

Для настройки КС на ТО достаточно применить пропорциональный (П-) регулятор с коэффициентом $K_{РС}$, вычисляемым по формуле ([3], с. 95)

$$K_{РС} = \frac{c \cdot K_T \cdot T_m}{4\tau \cdot K_c \cdot R_{я}} \quad (8)$$

Если настройка проведена верно, контур скорости должен обладать ([3], с. 95) динамическими свойствами, близкими к свойствам колебательного звена

$$W_{КС}(p) = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{8 \cdot \tau^2 \cdot p^2 + 4 \cdot \tau \cdot p + 1}, \quad (9)$$

или (более грубая оценка) – инерционного звена 1-го порядка:

$$W_{КС}(p) = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{1 + 4\tau \cdot p}. \quad (10)$$

Сравнение формул (5) и (10) показывает, что динамические свойства оптимизированного контура скорости аналогичны свойствам контура тока при условии удвоения малой постоянной времени. **Последовательное удвоение малых постоянных времени по мере перехода от внутреннего контура к внешнему является недостатком системы подчинённого регулирования.** Обратите внимание на то, что в действительности ПФ КС в данном случае имеет четвёртый порядок.

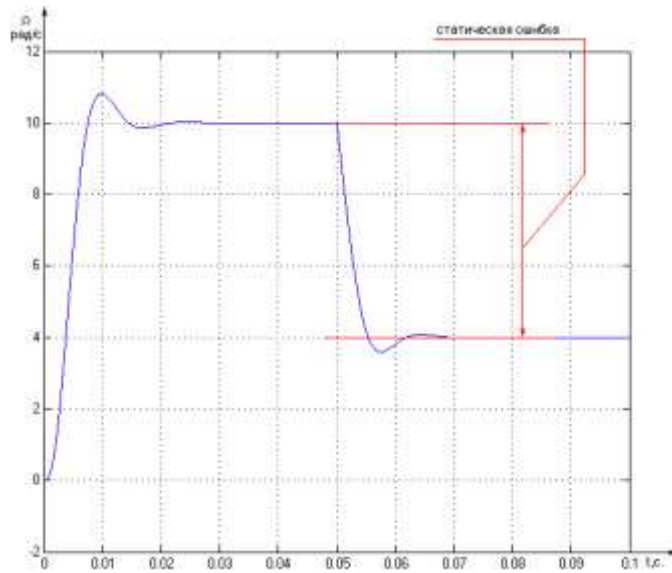


Рис. 5 - Реакция контура скорости с П - регулятором на момент сопротивления

Контур скорости с П – регулятором обладает статической ошибкой по возмущающему воздействию – моменту сил сопротивления (рис. 5). Передаточная функция контура скорости по моменту сил сопротивления $W_M(p) = \Omega(p)/M_c(p)$ приблизительно может быть представлена ([3], с. 96) в виде

$$W_M(p) = \frac{4 \cdot \tau}{J} \cdot \frac{1 + 2 \cdot p}{8 \cdot \tau^2 \cdot p^2 + 4 \cdot \tau \cdot p + 1}, \quad (11)$$

В статическом режиме после воздействия (или, как говорят – «наброса») скачкообразного момента сопротивления величиной M_c появится пропорциональное отклонение скорости (статическая ошибка, см. рис. 4) $\Delta\Omega_{уст} = (4\pi/J)M_c$.

3.4 Настройка контура скорости на симметричный оптимум

В качестве регулятора скорости в этом случае применяют ПИ - регулятор скорости с передаточной функцией ([2], с.142):

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \cdot \frac{T_{PC} \cdot p + 1}{T_{PC} \cdot p}. \quad (12)$$

При стандартной настройке на симметричный оптимум параметры регулятора скорости выбирают так ([2], с.142):

$$T_{PC} = 8 \cdot \tau; \quad K_{PC} = \frac{c \cdot K_T \cdot T_M}{4\tau \cdot K_C \cdot R_{я}}. \quad (13)$$

В [2], с.143 утверждается, что если настройка проведена верно, контур скорости должен обладать динамическими свойствами, близкими к свойствам ПФ

$$W_{KC}(p) = \frac{1}{K_C} \cdot \frac{1 + 8 \cdot \tau \cdot p}{64 \cdot \tau^3 \cdot p^3 + 32 \cdot \tau^2 \cdot p^2 + 8 \cdot \tau \cdot p + 1}. \quad (14)$$

Далее говорится, что в области низких частот приближением является также колебательное звено с постоянной времени 4τ и коэффициентом демпфирования 0.5:

$$W_{KC}(p) = \frac{1}{K_C} \cdot \frac{1}{16 \cdot \tau^2 \cdot p^2 + 4 \cdot \tau \cdot p + 1}. \quad (15)$$

Проверка моделированием показывает, что у этой ПФ и у реального (неупрощенного) контура скорости хорошо совпадают только времена регулирования (модель KСcompCO.mdl), то есть приближенное представление КС колебательным звеном (15) является весьма грубым. Переходный процесс ПФ

$$W_{KC}(p) = \frac{1}{K_C} \cdot \frac{1 + 3 \cdot \tau}{16 \cdot \tau^2 \cdot p^2 + 4 \cdot \tau \cdot p + 1}. \quad (16)$$

имеет лучшее совпадение с переходным процессом реального КС, чем (15), как по времени нарастания, так и по перерегулированию.

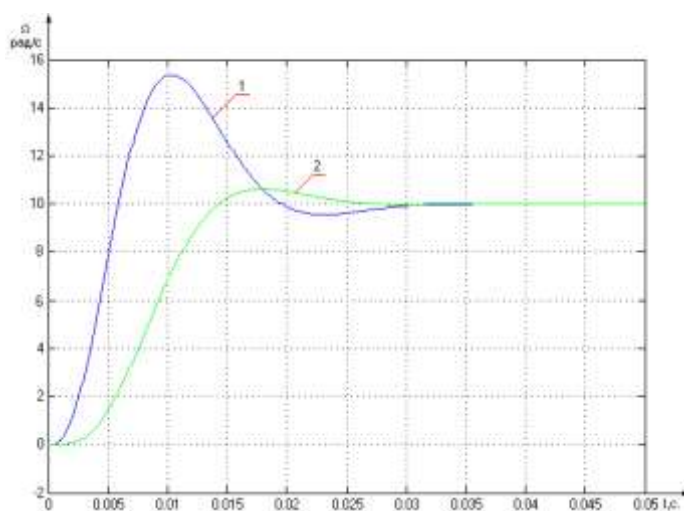


Рис. 6 - Влияние фильтра на входе контура скорости

Это подтверждает приведенное в [1], с. 214 высказывание о том, что обобщённое звено второго порядка достаточно часто принимают в качестве первого приближения модели объекта. Достаточно большое перерегулирование (примерно 50%) можно уменьшить, если на входе оптимизированного контура скорости включить апериодический фильтр с постоянной времени $T_\phi = 8 \cdot \tau$ ([2], с. 143). Модель KССО_f.mdl даст такой результат (рис. 6, кривая 1 — без фильтра, кривая 2 — с фильтром).

4 Порядок выполнения работы_1

Ознакомиться с моделями, которые будут применяться в ЛР №2. Для системы MATLAB\Simulink — берутся из папки SPR_M65.

4.1 Сформировать модель электропривода по формулам, в которых δ – Ваш день рождения, m – Ваш месяц рождения, z – Ваш год рождения:

$$J_g = 0.001m + 0.001\delta;$$

$$i_p = (\gamma + m + \delta)/10$$

$$C_e = C_m = C = (0.001m + 0.001\delta)/2$$

$$R_a = \min\{m, \delta\} \text{ Ом}$$

$$T_a = \max\{m, \delta\} \text{ мс}$$

$$K_p = \max\{m, \delta\}$$

$$\tau = 0.1 T_a$$

$$K_T = 0.001\delta$$

$$K_C = 0.001m$$

$$K_{dp} = (m + \delta)/2$$

$$I_n = \max\{m, \delta\} \text{ А – номинальный ток электродвигателя;}$$

$$\Omega_n = \max\{10m, 10\delta\} \text{ рад/с – номинальная скорость вращения ротора двигателя.}$$

4.5 Рассчитать настройку регулятора тока на технический оптимум (найти T_{PT} и K_{PT}). Промоделировать контур тока. Убедитесь в том, что настройка обеспечивает требуемые свойства.

4.3 Рассчитать настройку регулятора скорости на технический оптимум (найти K_{PC}). Промоделировать контур скорости. Убедитесь в том, что настройка обеспечивает требуемые свойства.

4.4 Рассчитать настройку регулятора скорости на симметричный оптимум (найти T_{PC} и K_{PC}). Промоделировать контур скорости. Убедитесь в том, что настройка обеспечивает требуемые свойства.

4.5. Сравнить моделированием между собой свойства контура скорости с ПИ-регулятором и П-регулятором при набросе момента сопротивления. Убедитесь в том, что настройка обеспечивает требуемые свойства.

Для системы MATLAB\Simulink – берутся из папки SPR_M65.

ВНИМАНИЕ! При использовании моделей для MATLAB\Simulink нужно обратить внимание на то, что объект внутреннего контура имеет вид 2А и расчёт настроек ПИ – регулятора для него должен вестись по формулам (14). ПИ – регулятор в моделях из папки SPR_M65 имеет вид $W_p(p) = K_p \cdot \frac{1 + T_p \cdot p}{T_p \cdot p}$, поэтому его

коэффициенты k_{II} и k_{II} должны быть пересчитаны в K_p и T_p (параллельное соединение двух ПФ заменяется последовательным). Действительно имеющие место степени полиномов внутреннего и внешнего контуров увеличиваются на единицу, однако все оценки остаются в силе