

Министерство образования и науки Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам по дисциплине
«Современные инструменты моделирования
и проектирования»
(для студентов специальности 151)

ПРАКТИКУМ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ

Краматорск 2018

УДК

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Современные инструменты моделирования и проектирования» (для студентов специальности 151). Практикум по моделированию / Сост. А. В. Лютая. - Краматорск : ДГМА, 2018 – 56 с.

Изложены принципы структурного и имитационного моделирования на примере автоматизированной системы управления перемещением электродов дуговой сталеплавильной печи. Рассмотрены особенности моделирования в средах MATLAB Simulink, SimPowerSystems, Simscape; MULTISIM; FLUIDSIM; MAPLE.

Составитель

А. В. Лютая, к. т. н., доц.

Ответственный за выпуск

А. В. Лютая, к. т. н., доц.

ВВЕДЕНИЕ

В производственном мире технологий и сложных технических агрегатов каждый день происходят нововведения, усовершенствования, модернизация с целью повышения эффективности использования оборудования и роста производительности.

Этапы решения какой-либо задачи или проблемы по специальности «Автоматизированное управление технологическими процессами» сводятся к стандартным процедурам:

1. Анализ базового технологического процесса; конструктивные и технологические особенности объекта автоматизации; особенности базовой системы управления; особенности электрооборудования объекта автоматизации или модернизации.

2. Критический анализ базовой системы управления, выявление недостатков системы и вопросов, которые необходимо решить. Критический анализ литературных источников научно-технической отечественной и зарубежной литературы, патентной информации с целью анализа существующих решений различных авторов. Выявление достоинств и недостатков известных методов решения. Формулировка цели и постановка задач проектирования.

3. Математическое описание базовой системы, технологического процесса с выбором и обоснованием метода моделирования.

4. Программная реализация математического аппарата с целью получения необходимых характеристик, параметров. Исследование системы автоматизации объекта с помощью разработанной модели в программной среде. Подтверждение адекватности разработанной модели (проведение эксперимента).

5. Конструкторско-техническая разработка проектируемой системы с учетом новейших достижений технологии производства в соответствии с поставленной целью и анализом существующих методов решений. Обоснование метода решения задачи. Выявление его преимуществ по сравнению с известными.

6. Обоснование экономической эффективности принимаемых решений.

7. Разработка практических рекомендаций по использованию и внедрению разработки.

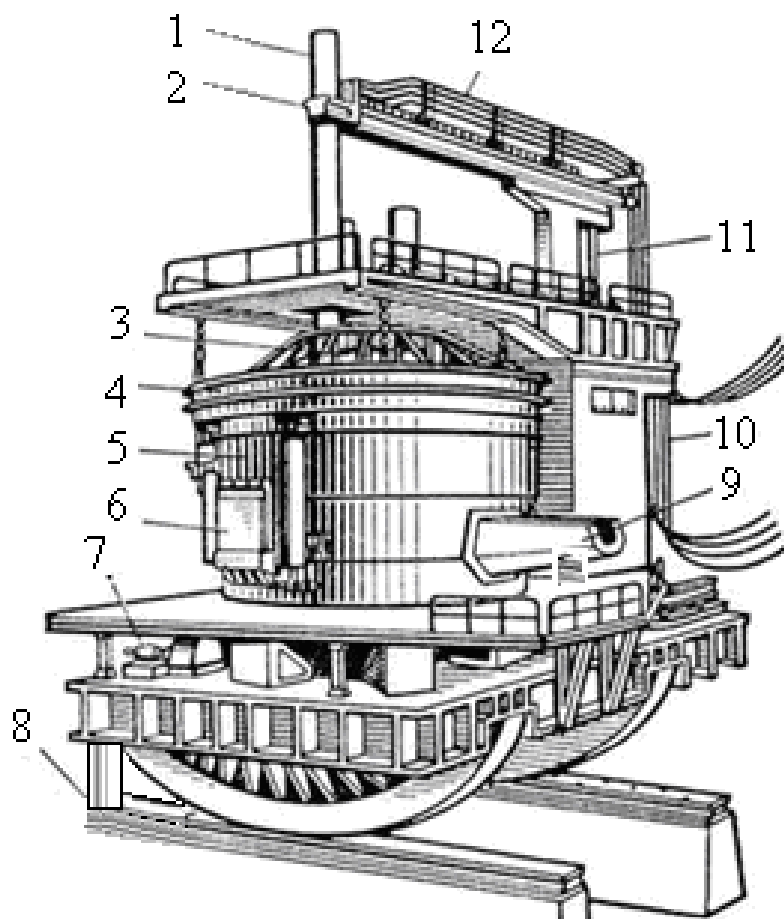
Очень важным моментом является процесс разработки модели объекта с целью проведения исследований и испытаний. От того, насколько приближена будет разрабатываемая модель объекта к реальному, зависит точность и эффективность применения разработок, экономический эффект от внедрения.

Ключевую роль в металлургической отрасли играет сталеплавление. На производство стали во всем мире расходуется порядка 60% энергии.

В данном методическом пособии предлагается на примере **автоматизированной системы управления перемещением электродов (АСУ ПЭ) дуговой сталеплавильной печи (ДСП)** рассмотреть принципы моделирования в различных программных средах и их возможности.

1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В ТРЕХФАЗНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

На **рис. 1.1** представлен общий вид дуговой сталеплавильной печи ДСП.



1 — графитированный электрод; 2 — электрододержатель; 3 — свод; 4 — водоохлаждаемое сводовое кольцо; 5 — кожух; 6 — окно рабочее; 7 — механизм поворота печи; 8 — механизм наклона печи; 9 — желоб сливной; 10 — подвижный токоподвод из водоохлаждаемых гибких кабелей; 11 — шток для вертикального перемещения системы стойка — рукав — электродержатель — электрод; 12 — токоподвод из охлаждаемых медных труб

Рисунок 1.1 – Общий вид дуговой сталеплавильной печи ДСП

Дуговая сталеплавильная печь переменного тока представляет собой мощный трёхфазный агрегат, в котором три электрические дуги горят между концами графитовых электродов и расплавляемым металлом. В ванне печи расплавляется загруженная шихта, затем металл очищается от вредных примесей, легируется, нагревается до нужной температуры и сливается из печи [1, 3].

Процесс обработки металла в ДСП можно разделить на два периода: *энергетический (электрический)*, во время которого происходит расплавление твердой шихты, и *технологический*, в котором осуществляются *окислительные* и

восстановительные реакции. Каждый из этих периодов характеризуется особыми условиями тепловых и электрических процессов [1-5].

После окончания завалки электроды опускают вниз и включают ток.

1. *Start* – начало периода расплавления, когда дуги зажигают над верхним уровнем шихты, вблизи свода. В начале энергетического периода из-за холодного состояния металла и остывшей печи электрические дуги имеют малую длину. Из-за недостаточной эмиссионной способности холодной шихты в межэлектродном промежутке дуги горят неустойчиво, беспокойно, перебрасываются с одного участка металла на другой, а электрическая мощность выделяется в небольшом объеме под электродами. Поэтому необходимо использовать ступени напряжения трансформатора с полным включением токоограничивающего реактора. При этом во избежание разрушения футеровки свода из-за прямого излучения дуг в непосредственной близости от его поверхности, необходимо работать на пониженном значении вводимой мощности. По мере расплавления шихты электроды начинают движение вниз, проплавливая в шихте колодцы. При прохождении концом электрода расстояния, большего, чем 1,0-1,5 диаметра электрода, прекращается прямое излучение дуг на футеровку свода. Это дает возможность увеличить вводимую мощность.

2. *Проплавление колодцев*. В этой стадии горение дуг по-прежнему неустойчиво из-за относительно плохих условий ионизации межэлектродного промежутка. Возможны обвалы шихты и короткие замыкания. Жидкий металл стекает вниз, формируя металлическую ванну, достаточную для защиты футеровки подины от теплового воздействия электрических дуг. Этап ведут на максимальной вводимой мощности с полным включением токоограничивающего реактора и заканчивают, когда дуги достигают поверхности жидкого металла. При этом для замедления движения электродов вниз, что необходимо для образования под ними достаточного уровня жидкого металла, в конце этапа изменяют уставку тока, снижая мощность.

3. *Формирование общей плавильной зоны*. Дуги горят под слоем шихты между электродами и жидким металлом. В это время создаются благоприятные теплофизические условия для дугового разряда, электрический режим стабилизируется. Экранирование футеровки и нахождение электрических дуг в колодцах позволяет плавить шихту в режиме "закрытого" горения дуг и с высокой эффективностью использовать максимальную электрическую мощность. По мере увеличения количества жидкого металла и заполнения жидким металлом пустот между кусками твердой шихты электроды начинают постепенно поднимать вверх. Вследствие этого дуги постепенно открываются и свободно излучают энергию во всех направлениях, т.е. на свод, стену ванны, наблюдается резкий рост температуры внутренней поверхности футеровки и во избежание ее перегрева необходимо снижать мощность дуг.

4. *Доплавление и нагрев металла до заданной температуры*. Этап происходит при "открытом" горении дуг и продолжается до нагрева ванны металла до заданной температуры. Печь работает на коротких дугах при менее благоприятных электротехнических режимах эксплуатации.

Продолжительность периода расплавления шихты зависит от вводимой в печь мощности. Сокращение простоев в период расплавления также способствует повышению производительности печи.

Отбором первой пробы металла заканчивается энергетический период и начинается технологический. К концу плавления температура металла должна быть в пределах 1480 – 1520 °С [1-5].

Во время окислительного периода обеспечивается снижение содержания фосфора в металле; уменьшают содержание водорода, азота и неметаллических включений; приводят ванну в стандартное по окисленности состояние, облегчающее протекание восстановительных реакций [2].

В восстановительном периоде производится раскисление и десульфация металла и доведение металла до заданной температуры и химического состава [4].

ДСП необходимо оснащать современными быстродействующими регуляторами перемещения электродов, обеспечивающими высокие технико-экономические показатели, быструю реакцию на изменения электрических параметров в силовой цепи ДСП и имеющими высокую надежность.

Период плавления шихты в ряде случаев составляет свыше половины продолжительности всей плавки. В этот период расходуется порядка 60-80 % энергии, потребляемой на плавку. Дуги горят неустойчиво, может происходить до 200 эксплуатационных коротких замыканий в течение одной плавки, которые приводят к нарушениям работы регуляторов перемещения электродов и увеличивают время плавки.

Поэтому очень важно разрабатывать способы стабилизации электрических координат с целью повышения эффективности работы печи. Для этого необходимо установить взаимосвязи в объекте, его системах, – математически описать его и программно реализовать с целью проведения исследований и установления всех необходимых взаимосвязей. А потом приступить к разработке средств усовершенствования.

В данном методическом пособии предлагается исследовать автоматизированную систему управления перемещением электродов дуговой сталеплавильной печи с помощью моделей в различных программных средах. Для этого сначала необходимо рассмотреть подробнее её составные части, их разновидности, разработать математическую модель данной системы, учитывая особенности объекта.

2 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ДСП

На **рис.2.1** представлена структурная схема АСУ ПЭ ДСП для одной фазы. Для двух других фаз схемы имеют такой же вид.

Автоматизированная система управления перемещением электродов ДСП состоит из электрической цепи и системы управления приводом перемещения электродов (СУ ППЭ) ДСП.

Электрическая цепь ДСП представляет собой трехфазную цепь, на вход которой подается напряжение вторичной обмотки печного трансформатора – напряжение сети U_c , а также действующее значение напряжения дуги $U_{\partial\partial}$, которое формируется с помощью блока преобразования длины дуги в напряжение ПДН, на вход которого подается сигнал длины дуги ℓ_{∂} , который формируется на выходе СУ ППЭ. Сигнал длины дуги преобразуется в действующее напряжение дуги согласно уравнению:

$$U_{\partial} = \alpha + \beta \cdot \ell_{\partial}, \quad (2.1)$$

где α – сумма падений напряжений у анода и катода; ℓ_{∂} – длина дугового разряда; β – падение напряжения на 1 мм столба дуги (градиент напряжения столба дуги), который зависит от периода плавки.

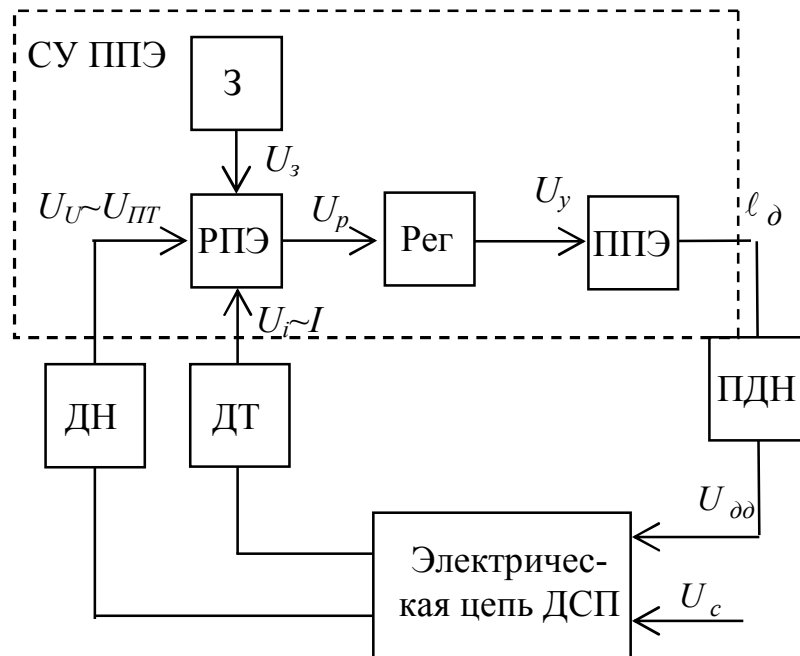
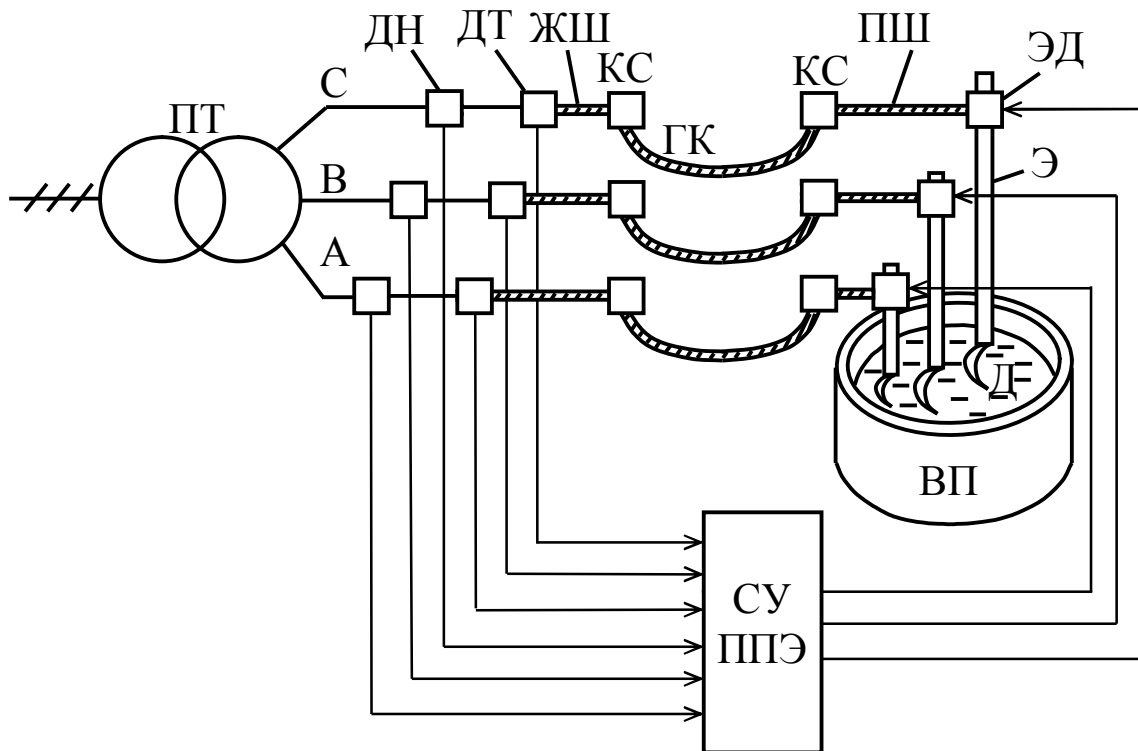


Рисунок 2.1 – Структурная схема АСУ ПЭ ДСП для одной фазы

На вход СУ ППЭ подаются сигналы с датчиков напряжения ДН и датчика тока ДТ. В идеале нужно было бы подавать сигнал напряжения дуги, однако его точно

измерить невозможно по причине высоких температур в зоне измерения, поэтому в качестве сигнала, пропорционального напряжению дуги, обычно на вход СУ ППЭ подают сигнал с датчика напряжения U_U , который устанавливается на вторичной обмотке трансформатора, поэтому он представляет из себя разность сигналов фазного напряжения и падения напряжения на сопротивлениях трансформатора (см. рис. 2.2). В итоге на вход СУ ППЭ подается сигнал, пропорциональный $U_U \sim U_{ПТ}$.

Сигналы с датчиков поступают на регулятор перемещения электродов РПЭ, которые бывают трех видов: *токовый, дифференциальный и импедансный* (см. пункт 2.2.1). В данном регуляторе происходит сравнение с заданием и с выхода РПЭ сигнал рассогласования поступает на П, ПИ или ПИД-регулятор Рег. Сигнал управления U_y с регулятора Рег поступает на привод перемещения электродов ППЭ, который может быть двух типов: *электрохимический* (меньше применяется) и *электрогидравлический* (см. пункт 2.2.2). На выходе ППЭ формируется сигнал на перемещение электрода, то есть, по сути, сигнал длины дуги l_d .



ПТ – печной трансформатор; ДН – датчики напряжения; КС – контактные соединения; ГК – гибкие кабели; ЖШ – жесткие трубчатые водоохлаждаемые шины; ПШ – подвижные шины; ДТ – датчики тока; ЭД – электрододержатели; Э – электроды; Д – электрическая дуга; ВП – ванна печи; СУ ППЭ – система управления приводом перемещения электродов

Рисунок 2.2 – Функциональная схема объекта исследования

2.1 Электрическая цепь ДСП. Математическое моделирование

Электроэнергетический тракт ДСП, включающий в себя вторичную цепь печного трансформатора, то есть «короткую сеть», электрододержатели, электроды,

электрическую дугу, твёрдофазную шихту, в начале расплавления представляет сложную электромеханическую систему [1, 21, 43, 71].

Короткая сеть (вторичный токопровод) ДСП состоит из пакета плоских медных жестких шин ЖШ, соединяющих выводы трансформатора с гибкими кабелями ГК, непосредственно гибких токопроводов и пакета подвижных шин ПШ, соединяющих гибкие кабели с находящимися в электрододержателях электродами (см. рис. 2.2).

Задача выбора методов исследований влияет на точность моделирования процессов, поэтому является важным и ответственным этапом.

Существуют различные методы расчета как однофазных, так и трехфазных цепей ДСП.

В данной работе для расчёта цепей с дугами используется методика, основанная на применении нелинейных дифференциальных уравнений, которые позволяют точно и адекватно описывать поведение электрических цепей с дугами [8]. Активные и реактивные сопротивления фаз короткой сети принимаются независимыми от тока.

Самым несложным способом моделирования электрических дуг является замена дуги регулируемым активным сопротивлением [5], когда нелинейность дуги не учитывается. Поскольку целью лабораторных работ является изучение различных программных сред, а не полноценное точное моделирование процессов в электрической цепи ДСП, то с целью упрощения моделирования электрические дуги будут приняты в виде активных сопротивлений, не зависящих от тока. Это является допущением при разработке нашей математической модели.

При моделировании печной трансформатор рассматривается как реальный источник фазных ЭДС. При этом фазные напряжения с низкой стороны трансформатора вычисляются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_A(t) &= U_{Am} \sin(\omega t); \\ U_B(t) &= U_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right); \\ U_C(t) &= U_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right); \end{aligned} \right\}$$

где U_{Am}, U_{Bm}, U_{Cm} – амплитудные значения фазных напряжений с низкой стороны трансформатора,

$$U_{Am} = U_{Bm} = U_{Cm} = \frac{U_{2H}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}, \quad (2.2)$$

где U_{2H} – линейное номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора; ω – угловая частота.

Для фазы А общие фазные активные сопротивления и индуктивности рассчитываются следующим образом (для двух других фаз расчет аналогичен):

$$r_A = r_{Amp} + r_{Aжу} + r_{Aзк} + r_{Anm} + r_{Aэл}; \quad (2.3)$$

$$L_A = L_{Amp} + L_{Aжу} + L_{Aзк} + L_{Anm} + L_{Aэл}, \quad (2.4)$$

Для двух других фаз расчет аналогичен.

В каждом кабеле трехфазной линии передачи индуцируется не только э. д. с. самоиндукции, обусловленная переменным током в этом проводе, но также и э. д. с. взаимной индукции, обусловленная токами в других проводах линии [94, 95]. То есть будем учитывать и взаимные индуктивности между фазами, которые зависят от расстояний между проводниками. Поскольку расстояния между фазами одинаковы (если не учитывать колебаний гибких кабелей во время плавки), то взаимные индуктивности равны:

$$L_{AB} = L_{BC} = L_{AC}. \quad (2.5)$$

С учётом сделанных допущений электрическую часть дуговой печи можно представить эквивалентной электрической схемой, показанной на [рис. 2.3](#).

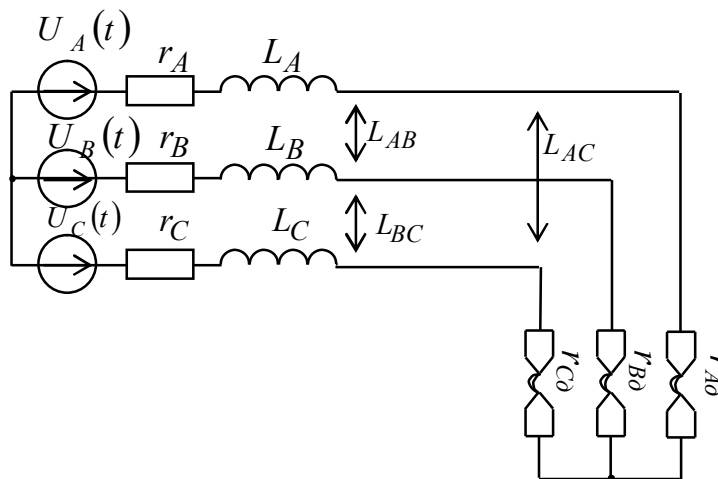


Рисунок 2.3 – Эквивалентная схема замещения трёхфазной цепи с дугами

Следуя предложенной методике для трёхфазной цепи, соединённой в «звезду», каждая фаза которой содержит электрическую дугу можно записать систему уравнений [71, 94, 95, 97, 98]:

$$\left. \begin{aligned} U_A(t) &= (r_A + r_{дА}) \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt}; \\ U_B(t) &= (r_B + r_{дВ}) \cdot i_B(t) + L_B \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt}; \\ U_C(t) &= (r_C + r_{дС}) \cdot i_C(t) + L_C \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_B(t)}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – мгновенные значения токов дуг.

В системе уравнений (2.6) неизвестными являются сопротивления дуг (поскольку их невозможно определить на практике) и производные токов. Но поскольку известно номинальное значение тока конкретной печи, то решая данную систему уравнений относительно производных токов, необходимо подобрать такое сопротивление дуги, чтобы выйти на нужный номинальный ток.

2.2 Системы управления приводами перемещения электродов ДСП

Структурная схема СУ ППЭ ДСП была приведена ранее на рис. 2.1. Она включает в себя регулятор перемещения электрода РПЭ, П, ПИ или ПИД-регулятор и привод перемещения электродов ППЭ.

На вход СУ ППЭ подаются сигналы с датчиков напряжения ДН и датчика тока ДТ. При моделировании эти сигналы берутся из модели электрической цепи ДСП. Далее сигналы подаются на регулятор перемещения электродов РПЭ.

Рассмотрим в отдельности разновидности этих элементов схемы.

2.2.1 Регуляторы перемещения электродов

Для регулирования положения электродов дуговых сталеплавильных печей применяют системы управления приводами перемещения электродов ДСП, которые можно классифицировать по различным показателям. По способу управления системы управления приводом перемещения электродов могут быть с дифференциальными, токовыми и импедансными РПЭ [1, 6, 12].

Величина подводимой к дуге мощности определяется исходя из выражения $P_d = \sum U_d I_d$, где U_d , I_d – напряжение и ток дуги. Отсюда следует, что постоянную величину подводимой мощности можно получить при различных соотношениях напряжения и силы тока дуги. Однако подводимая мощность зависит также от величины дугового промежутка. Длина дуги определяет её мощность при определённых характеристиках системы питания. Поэтому при изменении длины дуги происходит управление мощностью. Если оставить электроды неподвижными, то режим работы дуг будет крайне неустойчив, и они могут погаснуть. Поэтому для регулирования величины дугового промежутка используют механизм перемещения электродов. При этом длина дугового промежутка может изменяться от нуля до некоторого значения, которое зависит от фазного напряжения.

В современных ДСП в качестве сигналов для управления используют ток дуги I_d и напряжение дуги U_d . Они непосредственно зависят от длины дуги ℓ_d [5, 12, 15, 16], т. к. длина дуги ℓ_d связана с действующим значением напряжения дуги U_d по формуле Фрелиха, которая при рабочих токах выше 10^4 А с достаточной степенью точности выражает действующее значение напряжения на дуге [5, 15, 17] по формуле (2.1).

Изначально на практике широкое распространение получили токовые (рис. 2.4) и импедансные РПЭ [1, 6, 15, 20].

Параметром регулирования $U_{рег}$ в токовом регуляторе выбрана сила тока I_{δ} дуги, сигнал которой снимается с датчика ДТ тока: $U_{рег} = K_m I_{\delta}$, где K_m – масштабирующий коэффициент МТ тока, зависящий от коэффициента трансформации трансформатора тока. Регулятор в процессе работы поддерживает неизменной силу тока печи. В токовом РПЭ дуги на его вход подаётся выпрямленное и отфильтрованное значение напряжения $U_{рег}$, пропорциональное значению тока дуги I_{δ} , которое сравнивается с заданием U_3 и формируется сигнал рассогласования U_p , влияющий на перемещение электродов [1, 6, 15, 20]:

$$U_p = U_3 - U_{рег} = K_m I_{\delta_3} - K_m I_{\delta} = K_m (I_{\delta_3} - I_{\delta}) = K_m \cdot \Delta I_{\delta}, \quad (2.7)$$

где I_{δ_3} – заданное значение силы тока дуги.

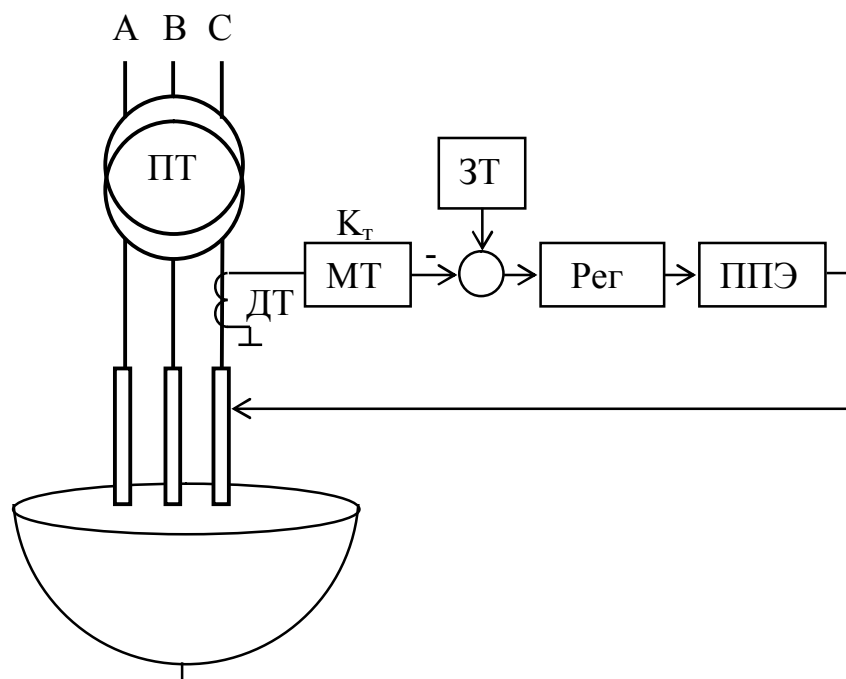


Рисунок 2.4 – Структурная схема системы управления приводом перемещения электродов ДСП с токовым регулятором для одной фазы

Задание ЗТ тока вводится при помощи напряжения постоянного подмагничивания дросселя, включаемого в токовую цепь регулятора.

Дифференциальный регулятор формирует разность сигналов, пропорциональных току дуги и напряжению на выходе печного трансформатора (рис. 2.5) [6, 20]:

$$U_p = K_m I_{\delta} - K_n U_{ПТ} = K_n I_{\delta} (K_m / K_n - U_{ПТ} / I_{\delta}) = K_n I_{\delta} (z_{\delta_3} - z_{\delta}) = K_n I_{\delta} \Delta z_{\delta}, \quad (2.8)$$

где K_m и K_n – переменный и постоянный коэффициенты, зависящие от коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов тока и

напряжения; $U_{ПТ}$ – напряжение на выходе печного трансформатора; $z_{\partial z}$, z_{∂} – заданное и текущее значения полного сопротивления дуги, в которое входят сопротивления элементов вторичного токопровода.

На рис. 2.5 приведена структурная схема СУ ППЭ ДСП с дифференциальным регулятором для одной фазы. Для двух других фаз схема аналогична.

Значения напряжений на выходе печного трансформатора и силы тока в фазах короткой сети контролируются с помощью датчиков напряжения ДН и тока ДТ. После масштабирования в усилителях (масштабирующие коэффициенты тока МТ и напряжения МН) с коэффициентами передачи K_m и K_n сигналы, соответствующие току и напряжению, вычитаются, и их разность подается на регулятор перемещения электродов. Заданное значение полного сопротивления дуги рассчитывается как $z_{\partial z} = K_m / K_n$, поэтому оно регулируется путем изменения коэффициента K_m . Коэффициент передачи K_n при этом не меняют. Регулятор вырабатывает сигналы управления ППЭ. Электрод перемещается, уменьшая сигнал рассогласования [6, 20].

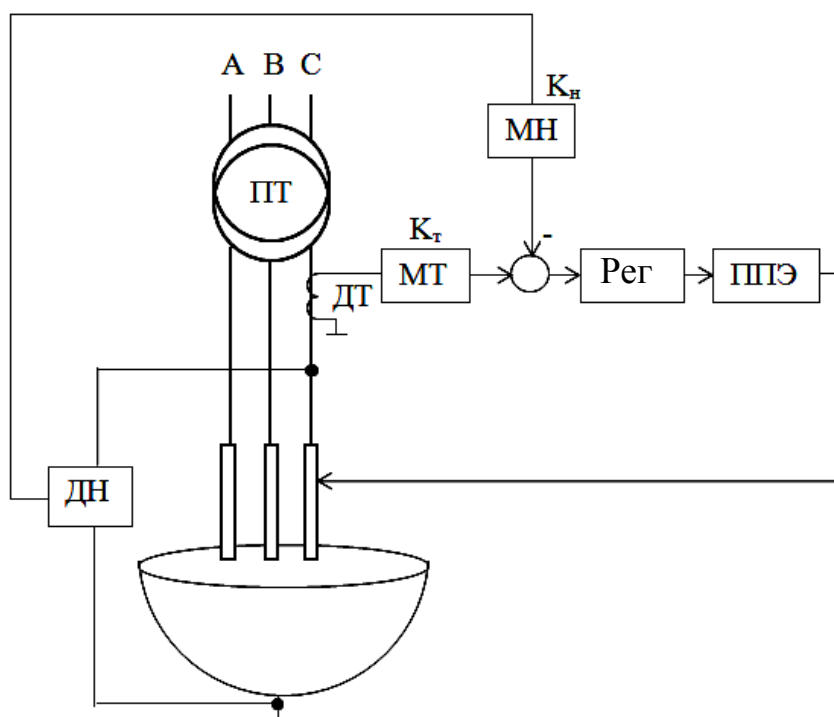


Рисунок 2.5 – Структурная схема системы управления приводом перемещения электродов ДСП с дифференциальным регулятором для одной фазы

В основе **импедансных** регуляторов перемещения электродов (см. рис. 2.6) лежат три независимых регулятора полного сопротивления для трех фаз [6]:

$$U_p = U_z - U_{рег} = K_z \cdot z_{\partial z} - \frac{K_n U_{ПТ}}{K_m I_{\partial}} = K_z \cdot z_{\partial z} - \frac{K_n}{K_m} z_{\partial} = K_z (z_{\partial z} - z_{\partial}) = K_z \Delta z_{\partial}, \quad (2.9)$$

где K_n и K_m – постоянные коэффициенты, зависящие от коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов напряжения и тока; z_d – полное сопротивление дуги.

На **рис. 1.7** приведена структурная схема СУ ППЭ ДСП с импедансным регулятором для одной фазы. Для двух других фаз схема аналогична.

В работе регулятора применяются значения с датчика напряжения ДН на выходе печного трансформатора и датчика тока ДТ дуги. Информация с выходов этих блоков передается на вход блока деления, где полученное напряжение делится на ток дуги, вследствие чего на выходе появляется сигнал с информацией об импедансе, т.е. полном сопротивлении дуги. Этот сигнал сравнивается с заданным значением сопротивления дуги с помощью задатчика сопротивления ЗС, формируя сигнал рассогласования, поступающий на РПЭ, с выхода которого сигнал управления поступает на ППЭ, изменяя величину дугового зазора, т.е. длину дуги [15, 20].

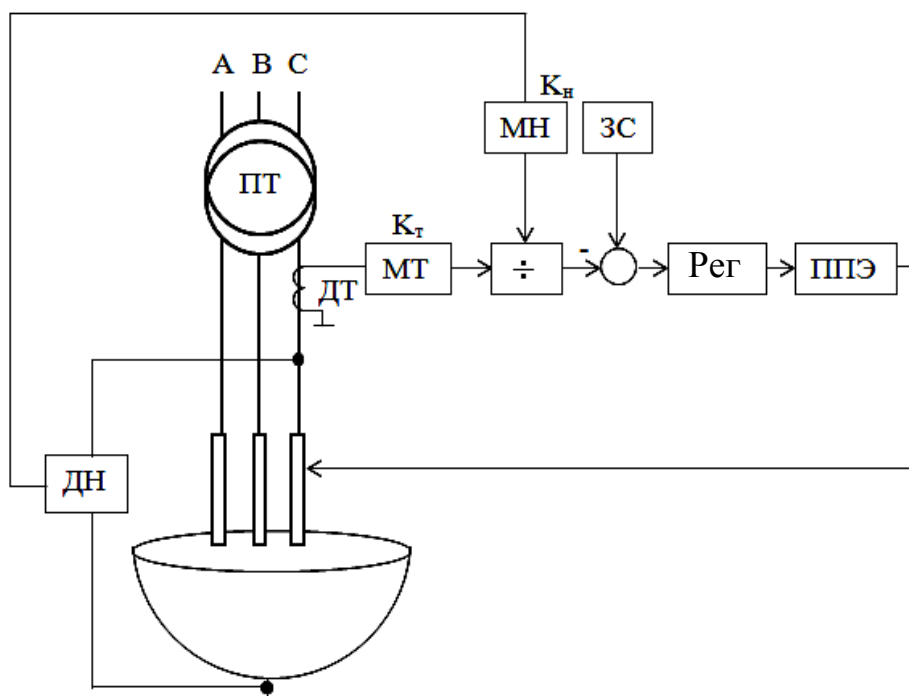


Рисунок 2.6 – Структурная схема системы управления приводом перемещения электродов ДСП с импедансным регулятором

Из рассмотренных СУ ППЭ с различными РПЭ системы управления с импедансными регуляторами лучше остальных позволяют регулировать длины дуг.

2.2.2 Привода перемещения электродов ДСП

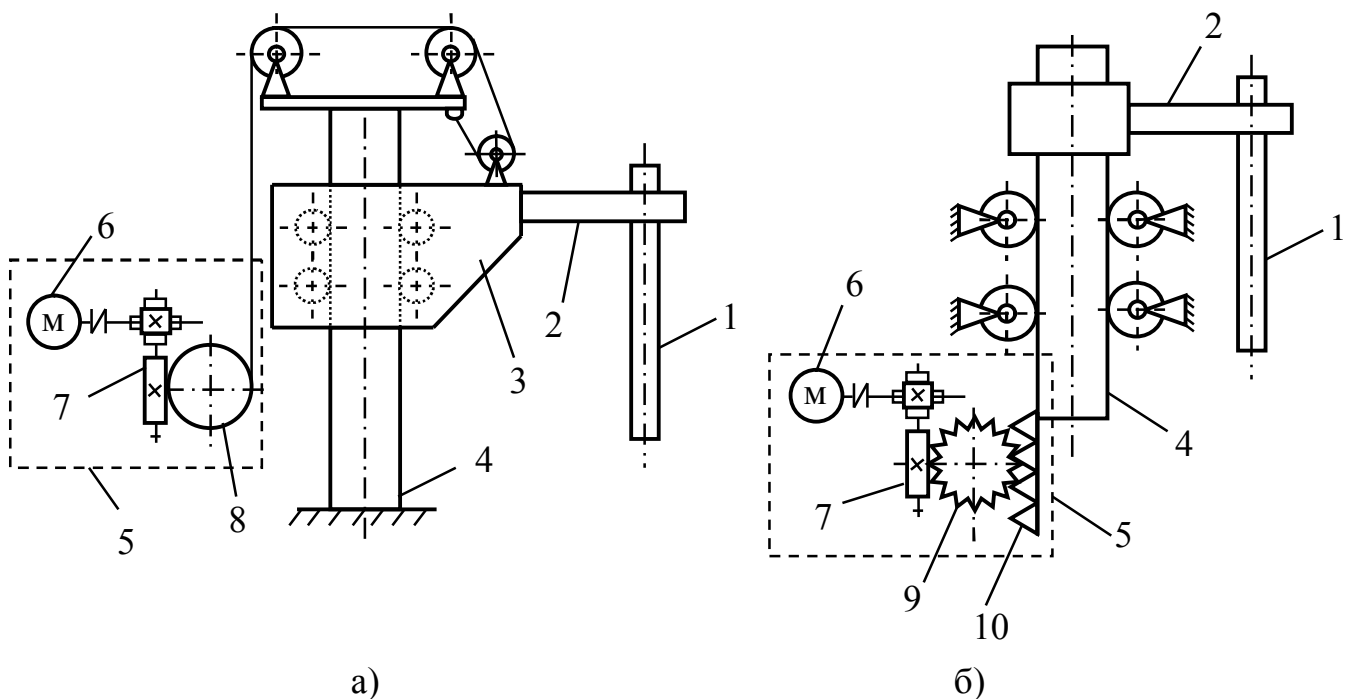
Привод перемещения электродов предназначен для перемещения подвижной части электрододержателя вместе с электродом во время завалки шихты и регулирования длины дуги. Роль ППЭ исключительно ответственна, так как отклонения электрических параметров от заданных необходимо ликвидировать

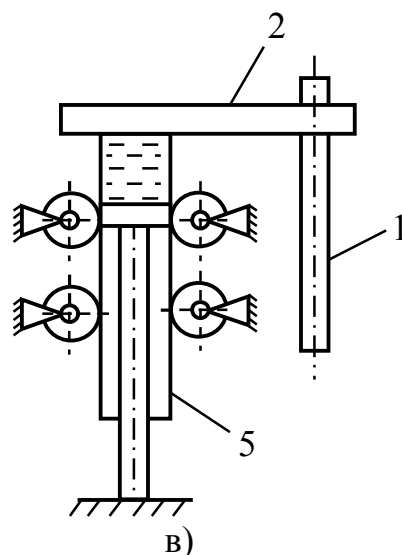
передвижением электродов за доли или единицы секунд. В то же время электрод необходимо устанавливать при заданной длине дуги с высокой точностью [3, 6]. Таким образом, качество работы ППЭ влияет на производительность печи, удельный расход электроэнергии, науглероживание металла.

В истории развития дуговых сталеплавильных печей при создании регуляторов перемещения электродов имели место два типа приводов: электромеханический и электрогидравлический [5-7, 6].

Исполнительный механизм с электромеханическим приводом состоит из электродвигателя, редуктора (червячного или цилиндрического), механической передачи (тросово-барабанной, реечной или винтовой) и конструкций, несущих электрод. Для быстрой ликвидации скачков тока в период расплавления шихты необходим подъём электродов с большой скоростью. Время подъёма зависит от скорости в установившемся режиме и от величины ускорения механизма, которое зависит от инерции подвижных частей механизма и от времени переходных электромагнитных процессов, которое сравнительно мало.

По конструктивному исполнению механизмов перемещения электродов электромеханические ППЭ делят на механизмы с перемещающимися каретками и неподвижными стойками (рис. 2.7, а) и механизмы с подвижными колоннами электрододержателей и неподвижной кареткой (рис. 2.7, б, в). На рис. 2.7 приняты следующие обозначения: 1 – электрод; 2 – электрододержатель; 3 – каретка; 4 – стойка (колонна); 5 – ППЭ; 6 – электродвигатель; 7 – редуктор; 8 – барабан; 9 – зубчатое колесо; 10 – рейка.





- а) с электромеханическим ППЭ тросово-барабанной передачей;
 б) с электромеханическим ППЭ и реечной передачей;
 в) с электрогидравлическим ППЭ

Рисунок 2.7 – Стойки

Инерционность системы управления приводом перемещения электродов зависит от конструкции исполнительного механизма [4]. Исполнительный механизм с тросово-барабанной передачей имеет время запаздывания 300 - 400 мс, в процессе эксплуатации вследствие увеличения зазоров время запаздывания возрастает до 800 - 1000 мс (см. рис. 2.7, а) [3]. Расчёты [3] показывают, что величина запаздывания в системе составляет порядка 100 мс и снижает допустимую скорость перемещения электродов. Высокие значения инерционности обусловлены наличием инерции двигателя, зазоров в передачах, сухого трения в механизмах, упругостью звеньев исполнительных механизмов, которая при высоких скоростях перемещения электродов приводит к механическим колебаниям, передающимся регулятору [4].

Однако в данном механизме обеспечивается наибольшая гарантия против поломок электродов при соприкосновении с твёрдой шихтой.

Также применяются механизмы с жёсткой кинематической связью, в которых тросовую передачу заменяют реечной (см. рис. 2.7, б). В этом случае запаздывание также значительно и составляет 75 - 150 мс. При этом обеспечивается большая долговечность и требуется меньший уход в эксплуатации [3, 6].

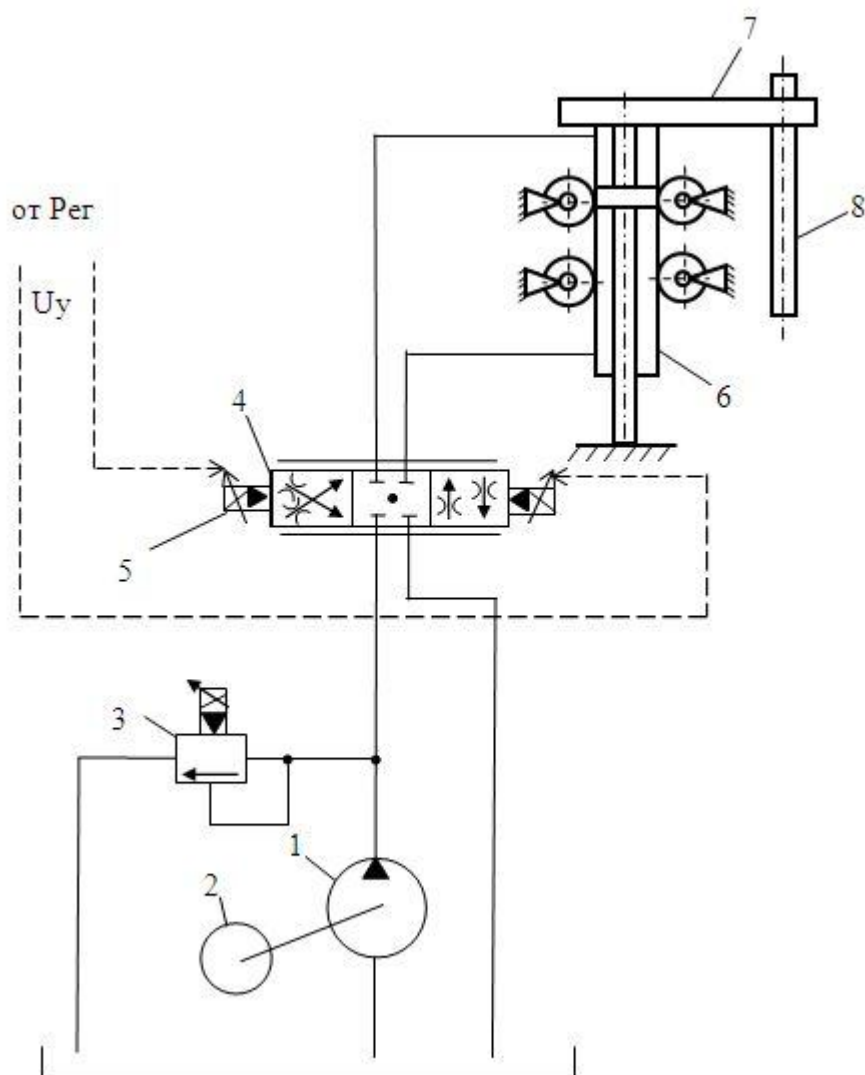
Наименьшее запаздывание (не более 60 мс) имеют **электрогидравлические приводы** (см. рис. 2.7, в). Их выполняют с объёмным и дроссельным управлением. Электрогидравлический привод с объёмным управлением имеет большой КПД передачи, недостатки – сложность и громоздкость. Привод с дроссельным управлением обладает малыми габаритами и весом, но низким КПД [4, 9].

В настоящее время электромеханический привод в ДСП более 40 т. практически полностью вытеснен электрогидравлическим. Это связано с более высоким быстродействием электрогидропривода, практически не имеющим инерционных звеньев (система "золотник - гидроцилиндр") [6, 10, 11].

Таким образом, литературный обзор систем приводов перемещения электродов ДСП показал, что наиболее оптимальным по всем параметрам является электрогидравлический ППЭ, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться и исследоваться системы с электрогидравлическим ППЭ [6, 10].

На **рис. 2.8** приведена функциональная схема электрогидравлического привода перемещения электрода одной фазы ДСП.

Вал ротора гидронасоса 1 получает вращение от вала ротора электродвигателя 2. Предохранительный клапан 3 служит для предохранения гидросистемы от давления, большего, чем давление его настройки. Трехпозиционный четырехлинейный дросселирующий распределитель с пропорциональным электрическим управлением служит для смены направления движения электрода 8, который через электрододержатель 7 соединён с гидроцилиндром 6. Шток гидроцилиндра является неподвижным. При поступлении жидкости в поршневую или штоковую полости гидроцилиндра перемещается не шток, а система «корпус цилиндра-электрододержатель-электрод». Сигнал управления U_y с выхода регулятора перемещения электрода (П, ПИ или ПИД) (см. **рис. 2.1, 2.8**) подается на пропорциональный электромагнит 5 гидрораспределителя 4. В зависимости от знака сигнала управления U_y он подается на один (при положительном уровне сигнала) или другой (при отрицательном уровне сигнала) электромагнит с целью переместить электрод вверх или вниз, соответственно. В зависимости от длительности сигнала электрод перемещается на определенное расстояние. Встроенные в гидрораспределитель дроссели служат для изменения скорости перемещения электрода в зависимости от уровня сигнала управления.



1 – гидронасос; 2 – электродвигатель; 3 – предохранительный клапан; 4 – дросселирующий гидрораспределитель с пропорциональным электрическим управлением; 5 – пропорциональный электромагнит; 6 – гидроцилиндр; 7 – электрододержатель; 8 – электрод; 9 – программатор

Рисунок 2.8 – Функциональная схема электрогидравлического привода перемещения электрода одной фазы ДСП

На каждую фазу предусматривается свой гидрораспределитель и гидроцилиндр для отдельного управления перемещением каждого электрода.

Например, на [рис. 2.9](#) приведена структурная схема АСУ ПЭ ДСП с импедансным регулятором перемещения электрода одной фазы.

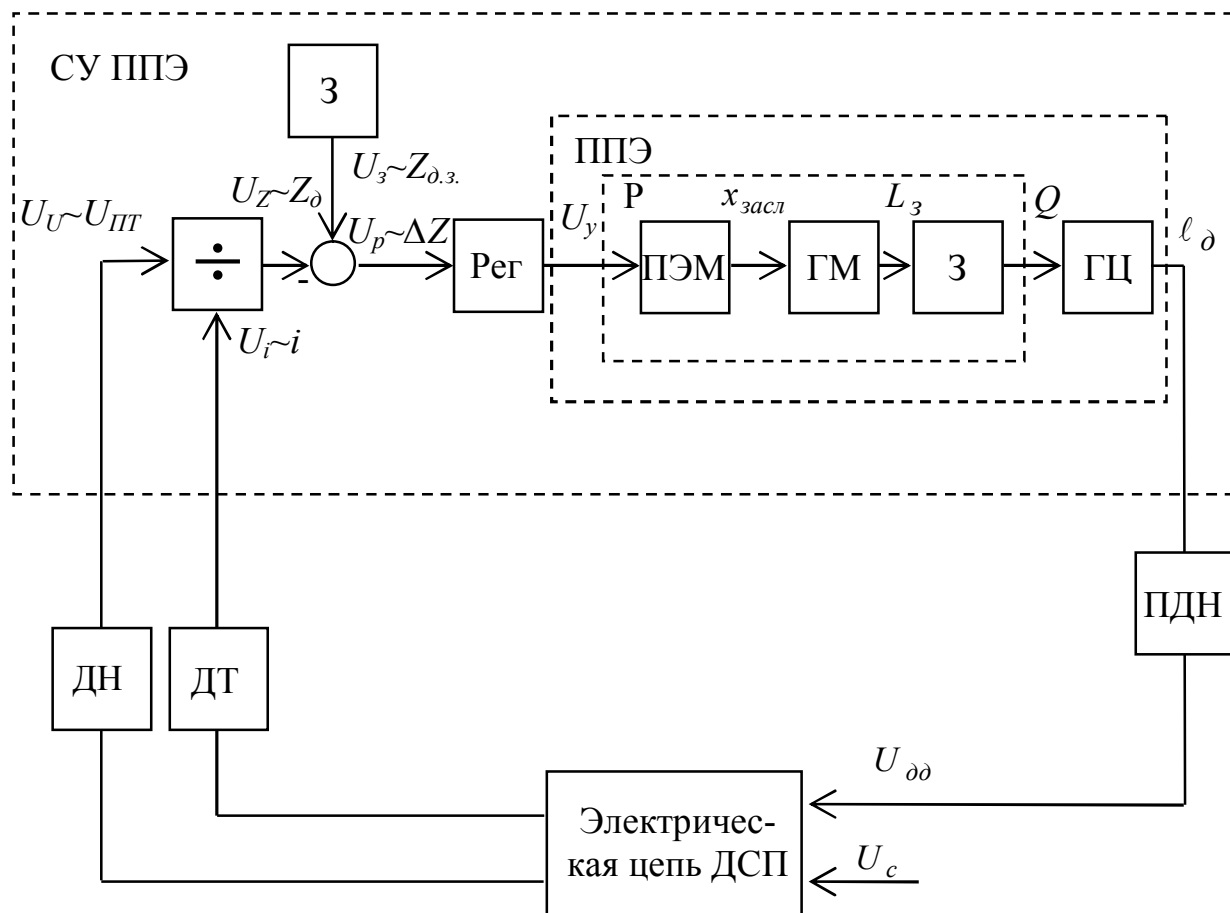


Рисунок 2.9 – Структурная схема АСУ ПЭ ДСП с импедансным регулятором перемещения электрода одной фазы

3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

3.1 Лабораторная работа № 1. Разработка модели электрической цепи ДСП в программной среде MATLAB Simulink

Цель работы. Изучение возможностей программной среды MATLAB Simulink на примере разработки модели электрической цепи ДСП: решение систем уравнений матричным способом, векторы и матрицы, способы задания синусоидальных сигналов, способы построения графиков, создание M-file и работа с ним.

Теоретическая часть

В данной лабораторной работе будет производиться программная реализация разработанной в **подразделе 2.1** математической модели электрической цепи ДСП в среде MATLAB Simulink.

Для решения системы (2.6) нелинейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} U_A(t) &= (r_A + r_{\partial A}) \cdot i_A(t) + L_A \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt}; \\ U_B(t) &= (r_B + r_{\partial B}) \cdot i_B(t) + L_B \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt}; \\ U_C(t) &= (r_C + r_{\partial C}) \cdot i_C(t) + L_C \cdot \frac{di_C(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_B(t)}{dt}, \end{aligned} \right\}$$

в программной среде MatLab Simulink воспользуемся матричным методом. Для этого приведем систему нелинейных дифференциальных уравнений (2.6) к виду системы линейных алгебраических уравнений относительно производных фазных токов:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2; \\ \dots & \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – неизвестные, которые необходимо найти; $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{mn}$ – коэффициенты системы; b_1, b_2, \dots, b_m – свободные члены, n, m – целые натуральные числа, $n = 1, 2, 3, \dots$; $m = 1, 2, 3, \dots$.

Данную систему уравнений можно переписать в матричной форме

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}, \quad (3.2)$$

где \mathbf{A} – основная матрица системы, \mathbf{B} – столбец свободных членов системы, \mathbf{X} – столбец решений системы,

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{vmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{vmatrix}.$$

Из уравнения (3.2) получим $\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$.

Итак, приведем систему уравнений (2.6) к виду системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L_A \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{AB} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{AC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt} &= U_A(t) - (r_A + r_{\partial A}) \cdot i_A(t); \\ L_{AB} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_B \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_C(t)}{dt} &= U_B(t) - (r_B + r_{\partial B}) \cdot i_B(t); \\ L_{AC} \cdot \frac{di_A(t)}{dt} + L_{BC} \cdot \frac{di_B(t)}{dt} + L_C \cdot \frac{di_C(t)}{dt} &= U_C(t) - (r_C + r_{\partial C}) \cdot i_C(t), \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где $\frac{di_A(t)}{dt}$, $\frac{di_B(t)}{dt}$, $\frac{di_C(t)}{dt}$ – неизвестные, которые необходимо найти.

Составим матрицу коэффициентов, вектор свободных членов и столбец решений системы (3.3):

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{AB} & L_B & L_{BC} \\ L_{AC} & L_{BC} & L_C \end{vmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{vmatrix} U_A(t) - (r_A + r_{\partial A}) \cdot i_A(t) \\ U_B(t) - (r_B + r_{\partial B}) \cdot i_B(t) \\ U_C(t) - (r_C + r_{\partial C}) \cdot i_C(t) \end{vmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{vmatrix} \frac{di_A(t)}{dt} \\ \frac{di_B(t)}{dt} \\ \frac{di_C(t)}{dt} \end{vmatrix}.$$

Практическая часть

Для начала открываем MATLAB и создаем новый проект модели: File -> New -> Model. И с помощью библиотеки Library Browser, которая вызывается нажатием на кнопку в меню (см. рис. 3.1), собираем структурную схему модели электрической цепи ДСП в среде MATLAB Simulink (см. рис. 3.2).

Для решения системы уравнений в математическом программном пакете MATLAB Simulink организовываются матрица \mathbf{A} коэффициентов и вектор \mathbf{B} свободных членов уравнений системы (3.3) с помощью блоков Vector Concatenate из библиотеки Library Browser. При этом обратите внимание на рис. 3.2 на размерности сигналов. Например, [3x1] – это три строки и 1 столбец, то есть вектор-столбец. Для получения вектора-столбца [3x1] в параметрах блока Vector Concatenate необходимо указать параметр Consatenate dimension равным 1. В случае создания вектора-строки этот параметр следует установить равным 2.

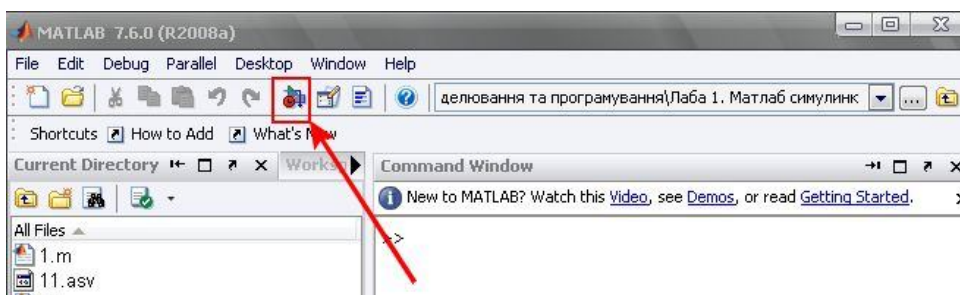


Рисунок 3.1 – Вызов библиотеки Library Browser

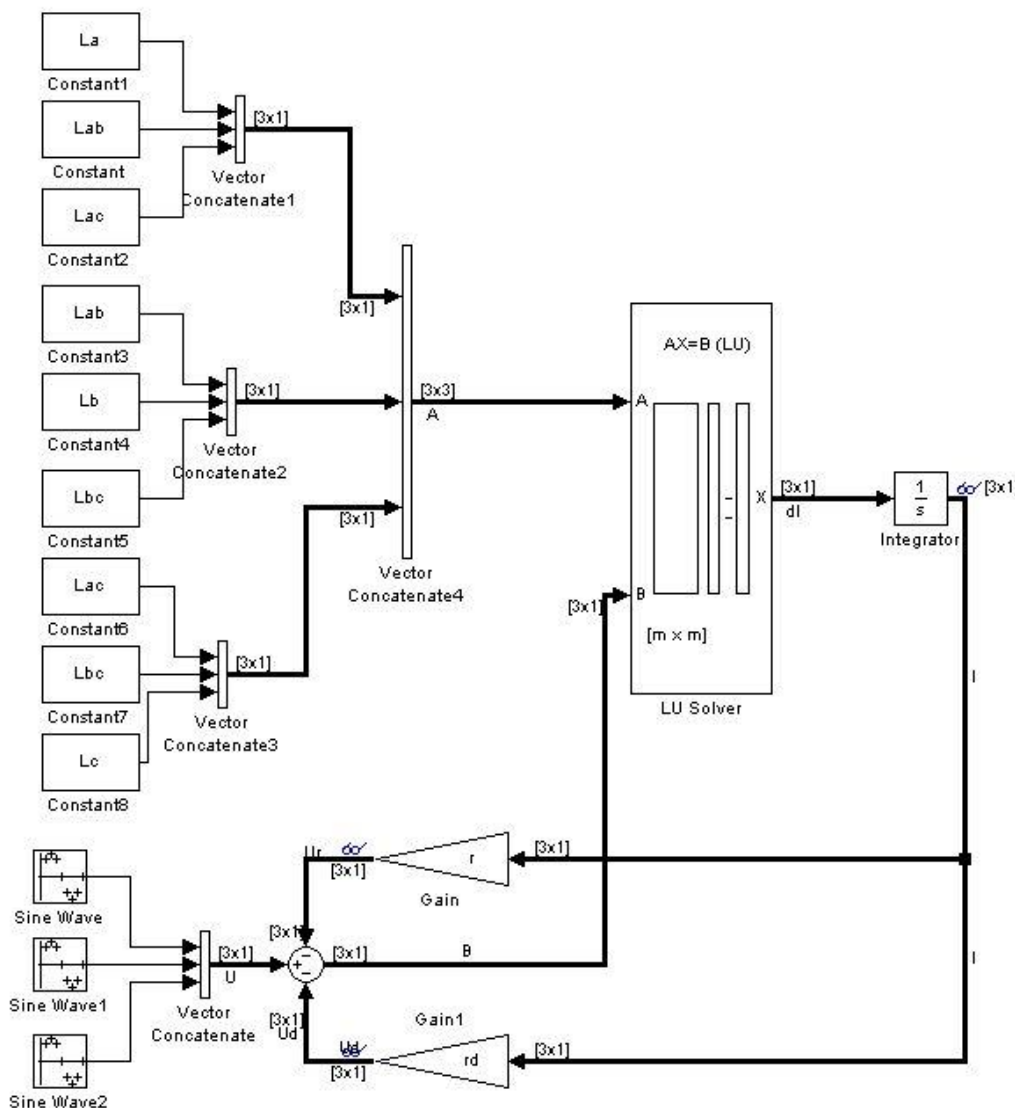


Рисунок 3.2 – Структурная схема модели электрической цепи ДСП в среде MATLAB Simulink

С использованием блока LU Solver получаем решение системы – вектор \mathbf{X} , то есть производные фазных токов. Для того чтобы получить токи, необходимо проинтегрировать данные сигналы, для чего используется блок Integrator. В его настройках необходимо установить начальное значение величины тока Initial

Condition. Причем поскольку данная модель оперирует с мгновенными значениями токов и напряжений, то в свойствах блока интегратора необходимо задавать не номинальное значение тока фазы, а амплитудное значение, которое определяется

$$I_{nm} = I_n \cdot \sqrt{2},$$

где I_n – номинальный ток.

Осталось задать синусоидальные сигналы источника питания $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$. И здесь могут быть варианты. Есть отдельные блоки в библиотеке Library Browser, формирующие синусоидальные сигналы.

Например, блок Sine Wave раздела Simulink библиотеки. В нем задается амплитуда сигнала, то есть амплитудное значение фазного напряжения, которое вычисляется по формуле (2.2). По условию будет задано значение линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора $U_{2н}$. Для преобразования линейного напряжения в фазное – делим на $\sqrt{3}$, а для преобразования фазного действующего в амплитудное – умножаем на $\sqrt{2}$. Также в нем задается частота ω колебаний и частота дискретизации сигнала с помощью полей, как показано на [рис. 3.3](#). Угловое смещение задается с помощью параметра Number of offset samples (см. [рис. 3.4](#)).

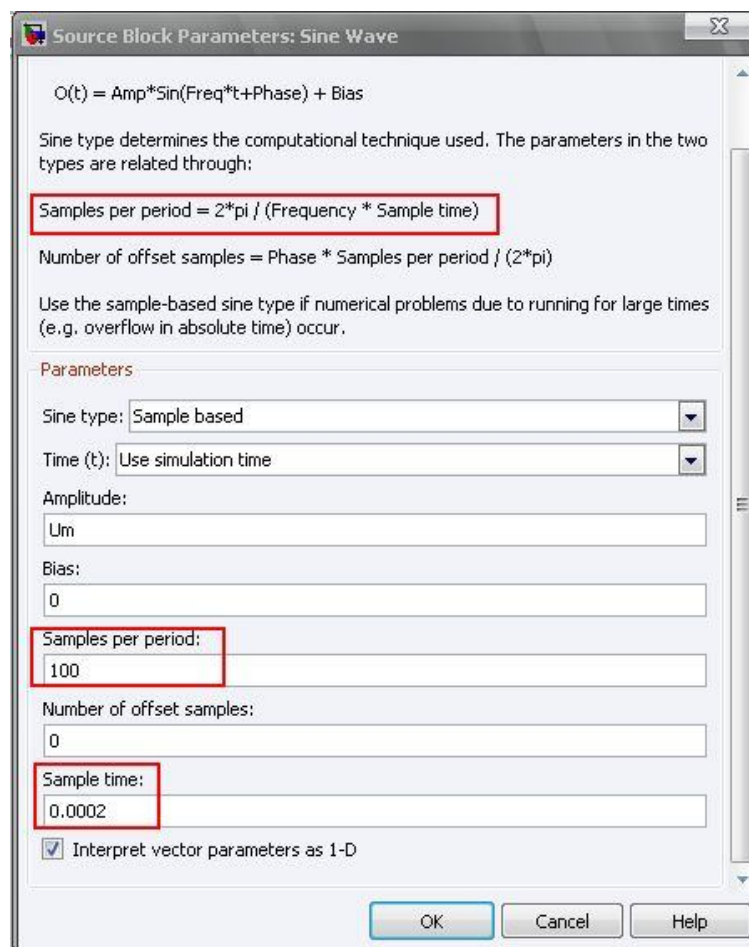


Рисунок 3.3 – Задание угловой частоты колебаний и частоты дискретизации сигнала

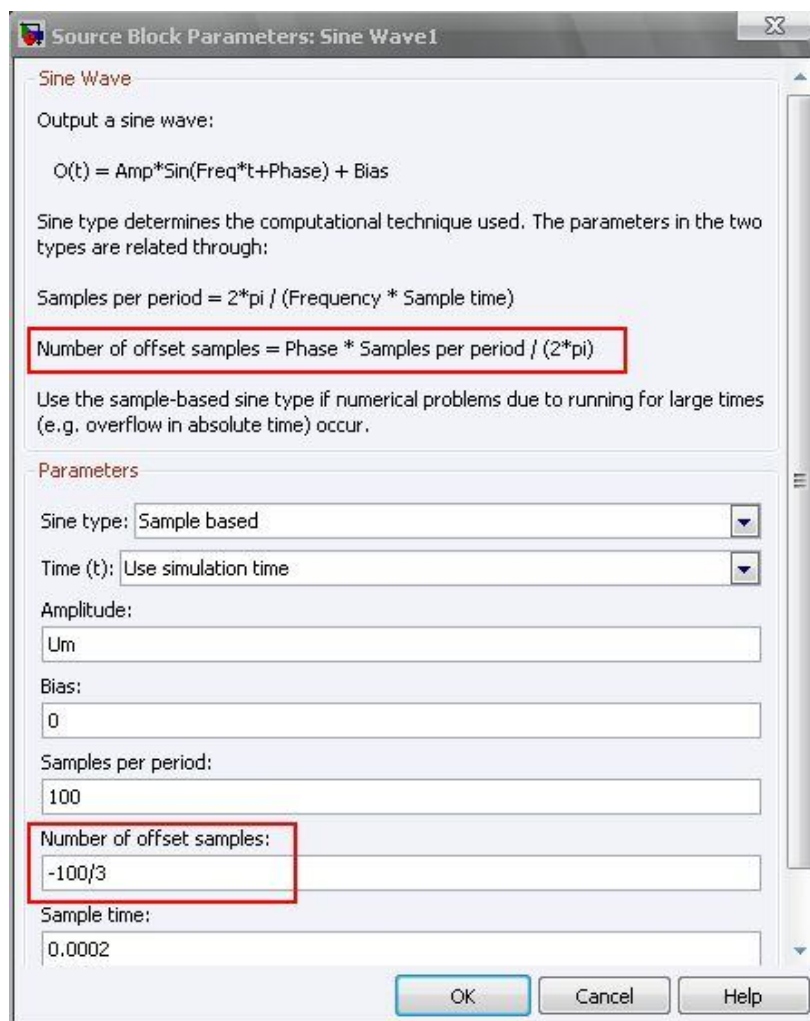


Рисунок 3.4 – Задание углового смещения

Также синусоидальные сигналы можно задать с помощью блоков Clock и Fcn, подключенных последовательно, как показано на [рис. 3.5](#).

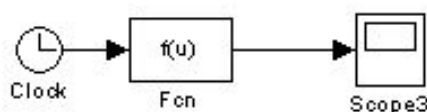


Рисунок 3.5 – Создание функции в соответствии с входным сигналом

Блок Clock формирует сигнал времени t . Для задания сигнала $U_A(t) = U_m \sin(314t)$ внутри блока Fcn записывается функция $U_m \cdot \sin(314 \cdot u(1))$ в соответствии со входным сигналом $u(1)$, который представляет из себя время t . Вообще на этот блок может подаваться несколько сигналов. Тогда необходимо использовать блок Mux для объединения нескольких сигналов в один, а при написании функции входные сигналы будут обозначаться $u(1), u(2), \dots, u(n)$, где n – количество входов.

Поскольку в нашей модели в качестве источника напряжения выступают три синусоидальных сигнала, то в библиотеке предусматривается и такой вариант в виде одного блока. Он находится в библиотеке Signal Processing Blockset и называется также Sine Wave. В его параметрах также вводится амплитуда сигнала в поле Amplitude, частота в Герцах в поле Frequency (Hz) и сдвиги фаз в радианах в поле Phase offset (rad) в виде вектор-строки (см. [рис. 3.6](#)).

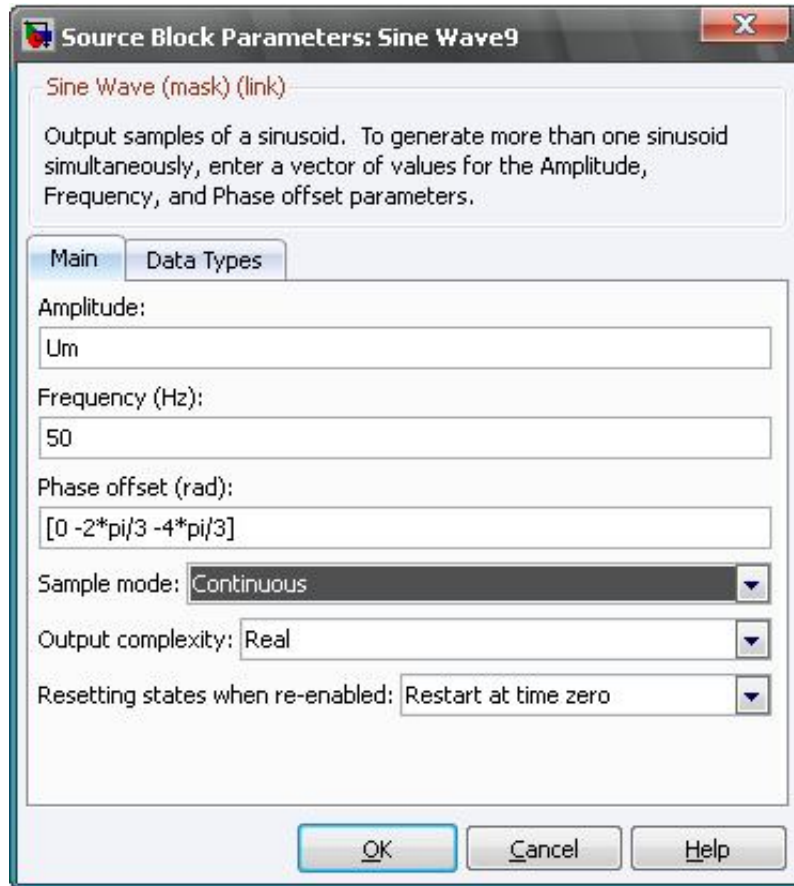


Рисунок 3.6 – Параметры блока Sine Wave библиотеки Signal Processing Blockset

При таком задании параметров на выходе блока формируется сигнал размерностью $[1 \times 3]$, то есть вектор-строка. Однако для нашей модели нужен сигнал вектор-столбец $[3 \times 1]$, который можно сформировать, используя уже известные вам блоки.

Как видно из [рис. 3.2](#), значения заданы в буквенном виде. Но их необходимо задать и сохранить в памяти MATLAB. Для этого необходимо создать M-file, в котором производится инициализация всех переменных (см. [рис. 3.7](#)).

Для создания M-file необходимо в меню программы MATLAB выбрать File -> New -> M-file. (В свежих версиях MATLAB: выбираем File -> New -> Script) Произвести инициализацию и расчет необходимых переменных, как показано на [рис. 3.7](#) (при этом ввести данные в соответствии со своим вариантом, которые указаны в [табл. 3.1](#)). Для того чтобы информация воспринималась не как текст, а как данные, воспринимаемые моделью, необходимо перед вводимой информацией поставить значок Cell Divider **%%**, который вызывается нажатием соответствующей кнопки меню (см. [рис. 3.7](#)). Для запуска на выполнение всех команд, содержащихся в файле,

следует выбрать пункт Run в меню Debug и нажать «Add to path» или нажать на кнопку в меню "Evaluate Cell", как показано на рис. 3.8, или кнопку правее. В более новых версиях MATLAB нажимаем кнопку «Run and Advance» в меню.

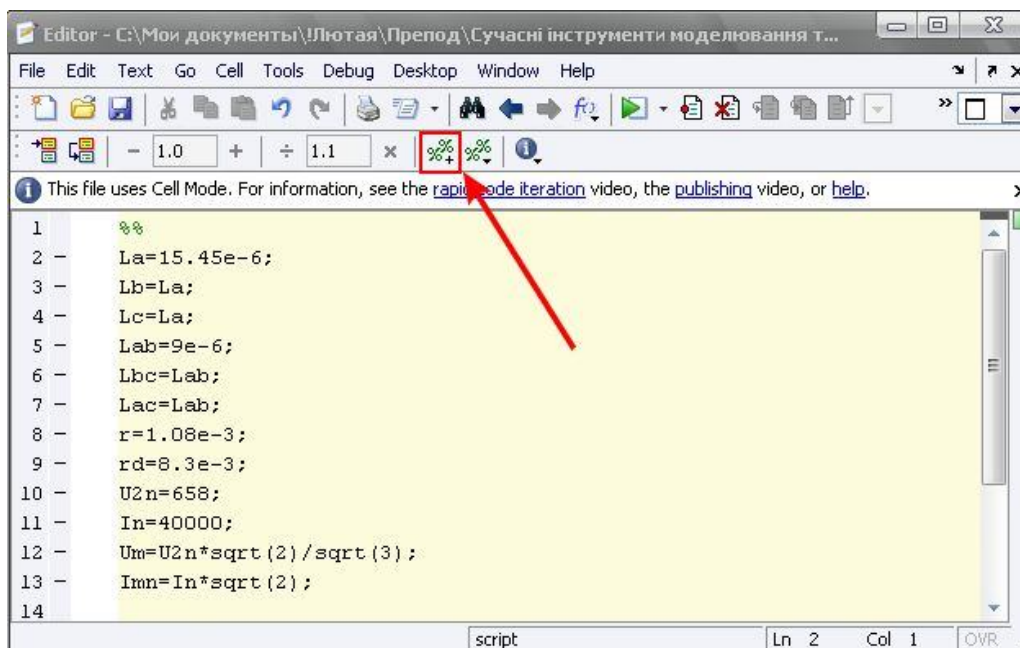


Рисунок 3.7 – Рабочее окно M-file

Как видно из рис. 3.2 данные задаются в матричном виде. Жирные линии в схеме свидетельствуют о том, что в данном сигнале содержится несколько сигналов (значения для трех фаз). Выделить сигнал определенной фазы можно с помощью блока Demux библиотеки Library Browser программного пакета MATLAB, задав в нём число выходов, соответствующее количеству содержащихся сигналов (в данном случае – 3). Для того чтобы на структурной схеме модели линии, содержащие несколько сигналов были выделены жирным цветом, необходимо поставить галочку, как показано на рис. 3.9.

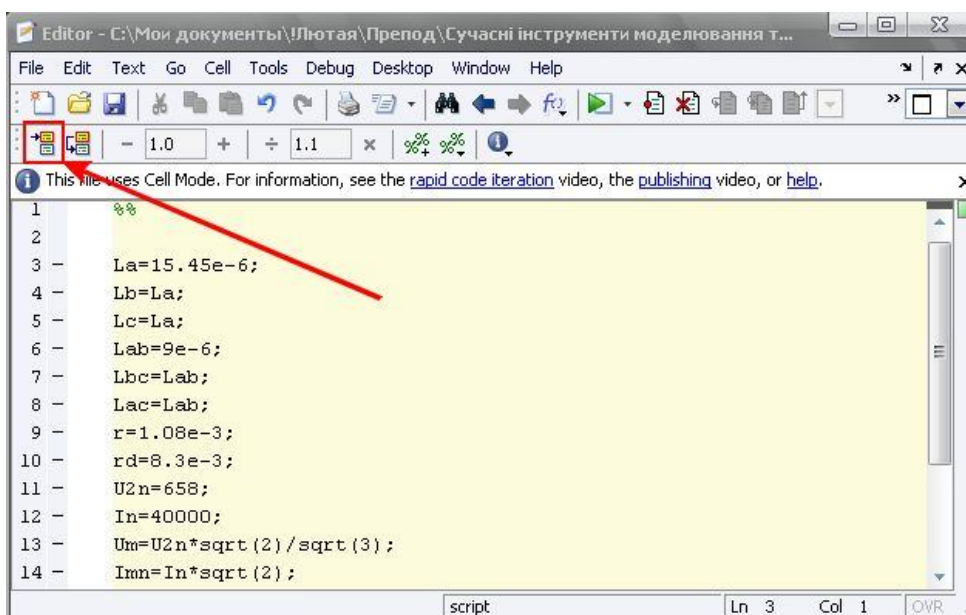


Рисунок 3.8 – Сохранение данных в память MATLAB

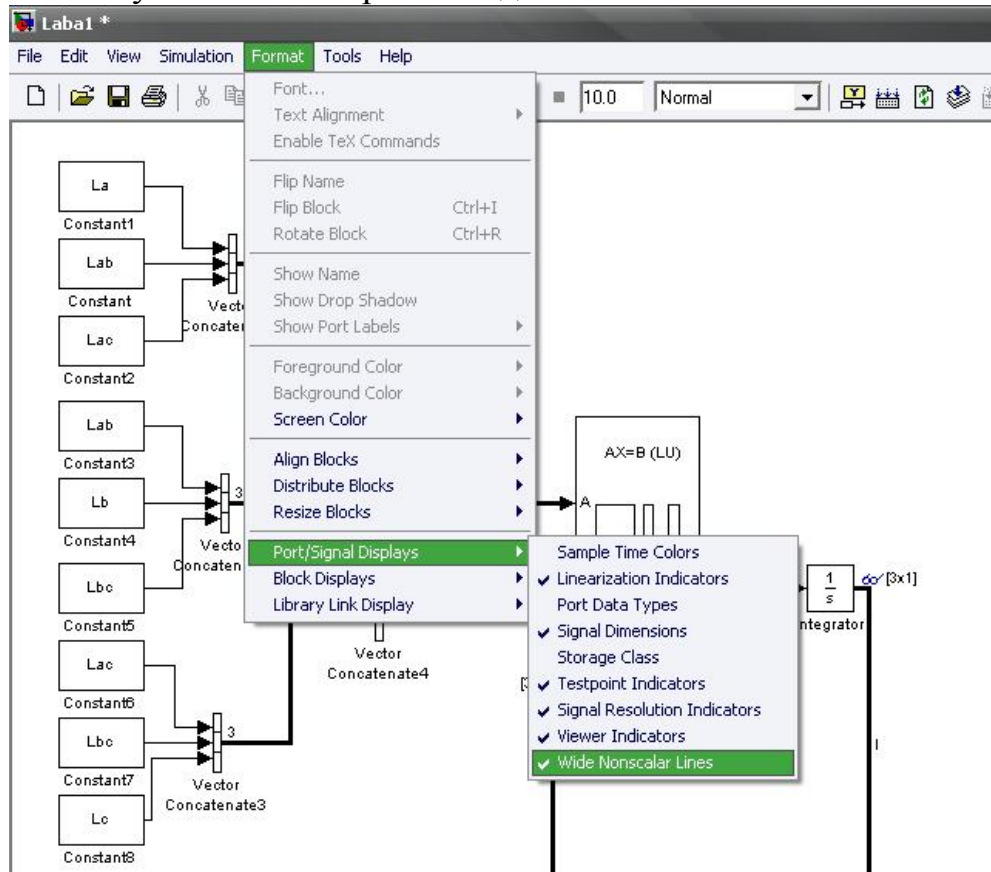


Рисунок 3.9 – Выделение сигналов жирным цветом

Также в структурной схеме среды MATLAB Simulink можно отобразить количество сигналов, находящихся в одной линии, поставив галочку, как показано на рис. 3.10.

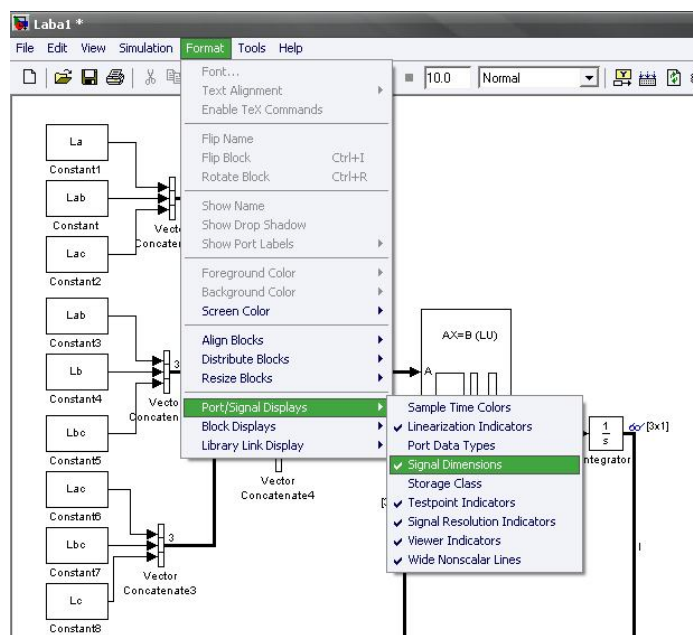


Рисунок 3.10 – Отображение количества сигналов в линиях

Построение графиков.

Для получения графиков можно воспользоваться блоком Scope из библиотеки.

Однако большое количество этих блоков в модели снижает быстродействие, поэтому есть другие варианты построения графиков.

Нажимаем правой кнопкой мышки на сигнал, график которого можно получить, и создаем просмотрщик графика (см. рис. 3.11). Заходим в него и настраиваем по аналогии с обычным Scope.

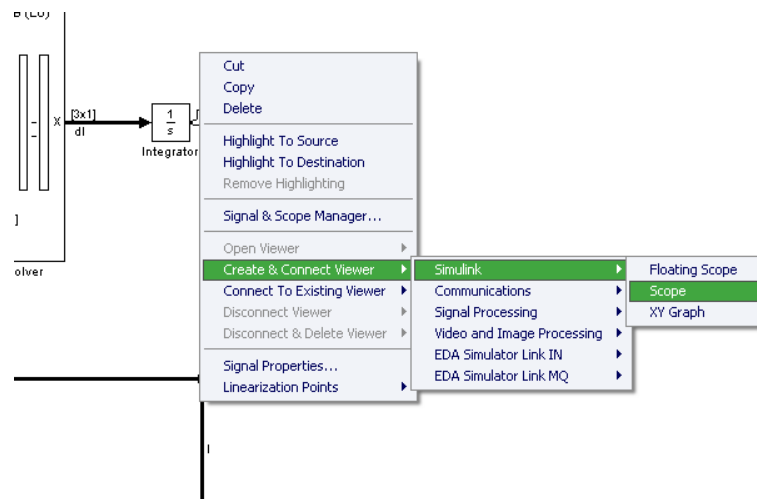


Рисунок 3.11 – Создание просмотрщика графиков

Также можно создавать графики с помощью M-File, используя функцию plot.

Задание

Собрать схему электрической трехфазной цепи ДСП согласно структурной схеме на рис. 3.2 в соответствии с вариантом задания (см. табл. 3.1), воспользовавшись предыдущими советами.

Поскольку сопротивление дуги точно измерить на практике невозможно, то при моделировании в нашей лабораторной работе мы будем подбирать сопротивление дуги таким, чтобы выйти на номинальный заданный ток.

В результате работы необходимо построить графики:

- напряжения источника питания;
- мгновенных значений фазных токов;
- мгновенных значений напряжений дуг.

Привести подобранное значение сопротивления дуги.

Таблица 3.1. Варианты заданий

№ варианта	U_{2H} , В	I_H , кА	r_A , мОм	L_A , мкГн	L_{AB} , мкГн
1	2	3	4	5	6
1	658	40	1,08	15,45	9,00

2	526	30	0,50	10,15	7,82
3	460	20	0,30	8,54	5,58
4	514	25	0,40	9,15	6,84

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6
5	652	38	0,70	13,47	8,73
6	486	28	0,40	7,86	4,37
7	527	30	0,50	8,10	5,58
8	582	31	0,60	10,37	7,58
9	624	34	0,80	11,56	7,37
10	635	35	1,00	14,67	8,76
11	512	29	0,70	10,73	7,54
12	610	32	1,00	15,00	9,01
13	645	36	1,00	15,03	9,14
14	574	30	0,90	14,98	8,02
15	536	28	0,40	6,57	4,00
16	524	30	1,00	10,00	7,00

3.2 Лабораторная работа № 2. Разработка модели электрической цепи ДСП в программной среде MATLAB SimPowerSystems

Цель работы. Изучение возможностей программной среды MATLAB SimPowerSystems на примере разработки модели электрической цепи ДСП: создание имитационной модели электрической цепи.

Практическая часть

В программной среде MATLAB SimPowerSystems можно создавать имитационные модели электрических цепей.

В нашем случае необходимо создать модель трехфазной электрической цепи ДСП. Для этого в соответствии с эквивалентной схемой замещения цепи ДСП, изображенной на **рис. 2.3**, можно проводить моделирование, как для каждой фазы отдельно, так и использовать блоки трехфазных элементов.

Как видно из **рис. 2.3** схема состоит из трех источников реальных ЭДС $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$, активных сопротивлений фаз r_A, r_B, r_C , собственных и взаимных индуктивностей L_A, L_B, L_C и L_{AB}, L_{BC}, L_{AC} , и сопротивлений дуг (как было сказано ранее с целью упрощения моделирования принимаются активными сопротивлениями $r_{\partial A}, r_{\partial B}, r_{\partial C}$).

В случае если нужны однофазные элементы, то в библиотеке элементов SimPowerSystems -> Electrical Sources источник реальной ЭДС выбираем AC Voltage Source. Но можно использовать готовый блок трехфазного источника ЭДС – Three-Phase Programmable Voltage Source.

Для моделирования активных и реактивных сопротивлений можно использовать блок Series RLC Branch. Для задания взаимных индуктивностей можно

воспользоваться блоком Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0, в котором задаются собственные активные сопротивления и индуктивности фаз.

Отдельными блоками активных сопротивлений моделируем сопротивления дуг и аналогично предыдущей лабораторной работе настраиваем их значения так, чтобы выйти на нужный номинальный ток согласно варианту (см. табл. 3.1).

Для снятия параметров тока и напряжения используются, соответственно, блоки Current Measurement и Voltage Measurement, которые подключаются так, как показано на рис. 3.12.

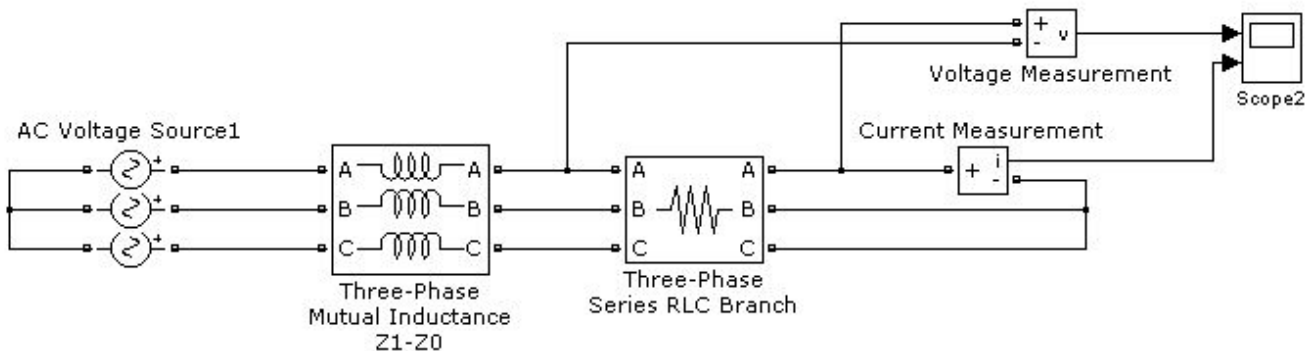


Рисунок 3.12 – Структурная схема имитационной модели трехфазной электрической цепи ДСП в программной среде MATLAB SimPowerSystems

Задание

Собрать схему электрической трехфазной цепи ДСП согласно схеме на рис. 3.12 в соответствии с вариантом задания (см. табл. 3.1), воспользовавшись предыдущими советами.

Поскольку сопротивление дуги точно измерить на практике невозможно, то при моделировании в нашей лабораторной работе мы будем подбирать сопротивление дуги таким, чтобы выйти на номинальный заданный ток.

В результате работы необходимо построить графики:

- напряжения источника питания;
- мгновенных значений фазных токов;
- мгновенных значений напряжений дуг.

Привести подобранное значение сопротивления дуги.

3.3 Лабораторная работа № 3. Разработка модели электрической цепи ДСП в программной среде Multisim

Цель работы. Изучение возможностей программной среды Multisim на примере разработки модели электрической цепи ДСП: создание имитационной модели электрической цепи.

Практическая часть

В программной среде Multisim можно создавать имитационные модели электрических цепей.

В нашем случае необходимо создать модель трехфазной электрической цепи ДСП. Для этого в соответствии с эквивалентной схемой замещения цепи ДСП, изображенной на рис. 2.3 и аналогично лабораторной работе № 2 будем создавать имитационную модель трехфазной электрической цепи ДСП.

Создаем новый файл, как обычно.

Далее собираем модель, как показано на рис. 3.13.

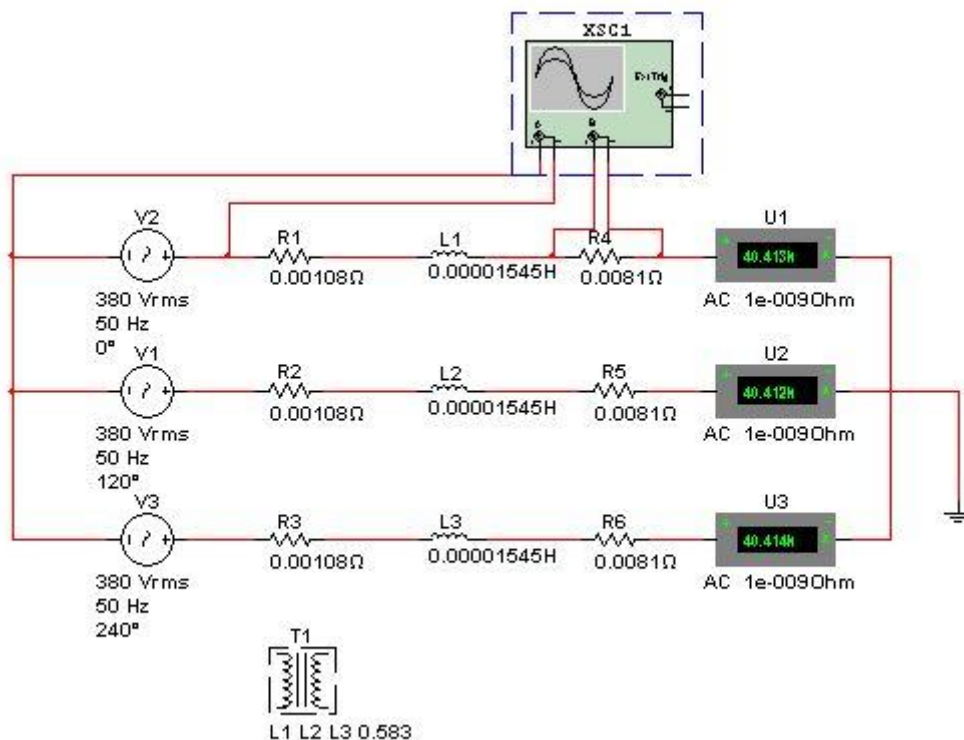


Рисунок 3.13 – Структурная схема имитационной модели трехфазной электрической цепи ДСП в программной среде Multisim

Для моделирования трех источников синусоидального напряжения нажимаем в меню на кнопку Place Source (см. рис. 3.14) и выбираем источник переменного напряжения AC_POWER, как показано на рис. 3.15. Нажимаем ОК. Устанавливаем его. Снова появляется окно выбора источников. Нажимаем Close.

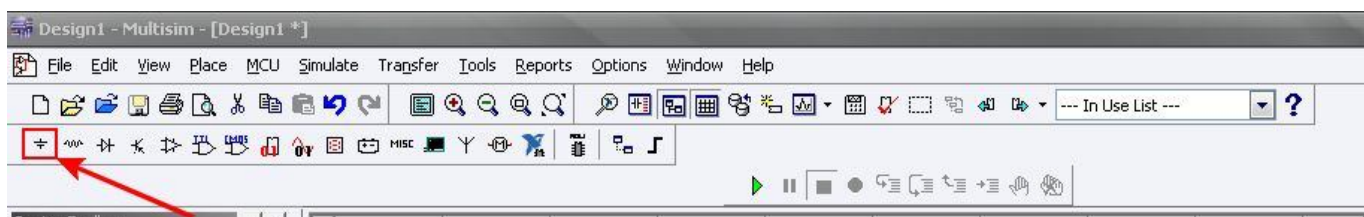


Рисунок 3.14 – Библиотека источников в Multisim

Дважды щелкаем на элемент источника AC_POWER, появляются его параметры (см. рис. 3.15). Настраиваем их в соответствии с заданием (табл. 3.1):

– напряжение фазное Voltage (RMS) в вольтах. Обратите внимание, что здесь необходимо указывать среднеквадратичное (действующее) значение напряжения, то есть

$$U_{ARMS} = U_{BRMS} = U_{CRMS} = \frac{U_{2H}}{\sqrt{3}}, \quad (3.4)$$

где U_{2H} – линейное номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора;

– частота Frequency– 50 Гц;

– фазовый сдвиг Phase (0, 120 и 240 градусов).

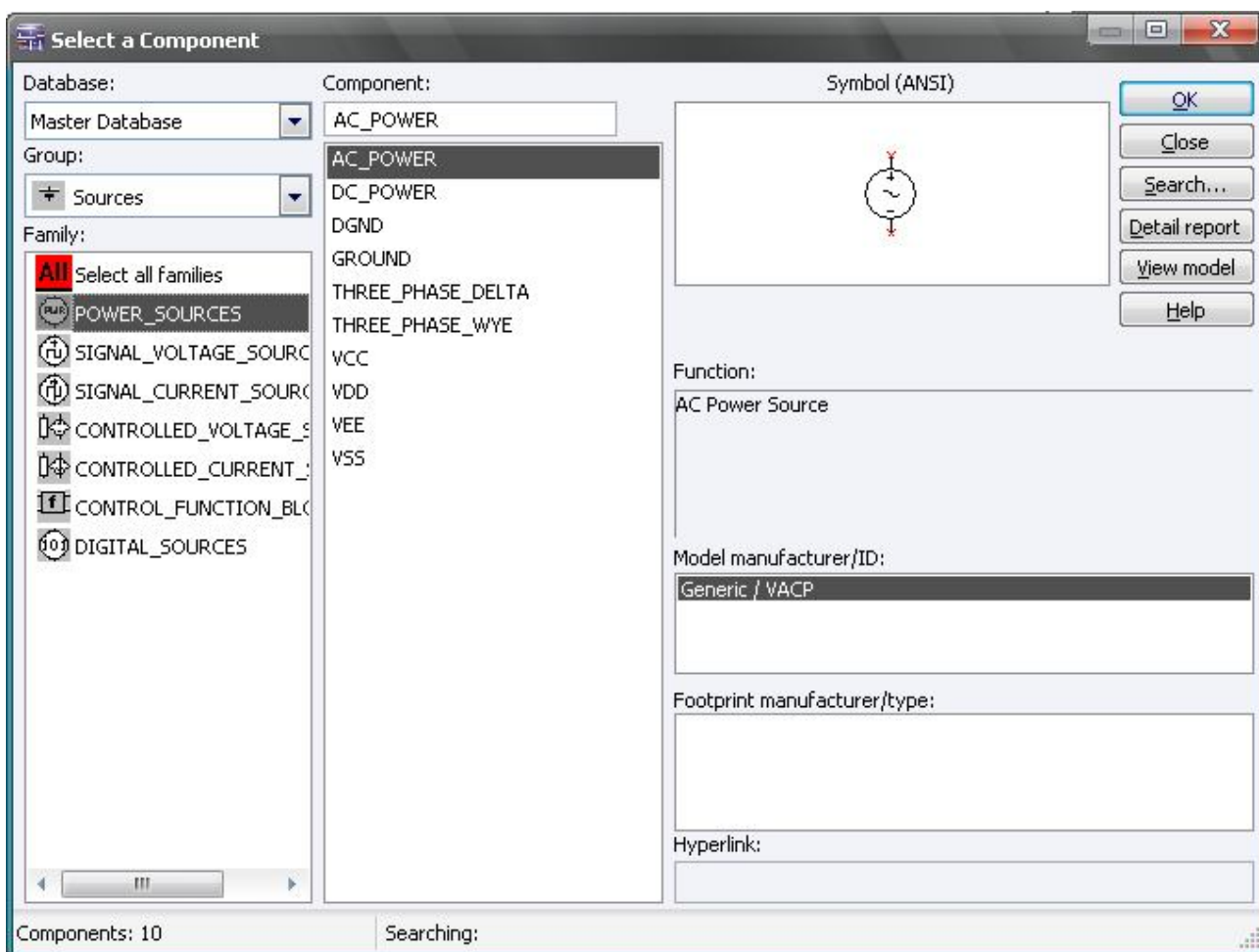


Рисунок 3.15 – Окно выбора источников в библиотеке источников Multisim

Аналогично создаем еще два источника синусоидального напряжения AC_POWER, параметры которых будут отличаться только фазовым сдвигом.

Далее добавляем из библиотеки активные сопротивления RESISTOR и собственные индуктивности фаз INDUCTOR. Для этого нажимаем на кнопку Place Basic (см. рис. 3.17). Выбираем элемент активного сопротивления RESISTOR, как показано на рис. 3.18. Элемент индуктивности выбираем там же – INDUCTOR. В

соответствии с вариантом вводим значения активного фазного сопротивления Resistance в Омах и значение собственной индуктивности каждой фазы Inductance в Гн. Также создаем активные сопротивления RESISTOR, имитирующие сопротивления дуг. В предыдущих лабораторных работах значение сопротивления Вы уже подбирали, поэтому вписывайте его и, если понадобится, откорректируете.

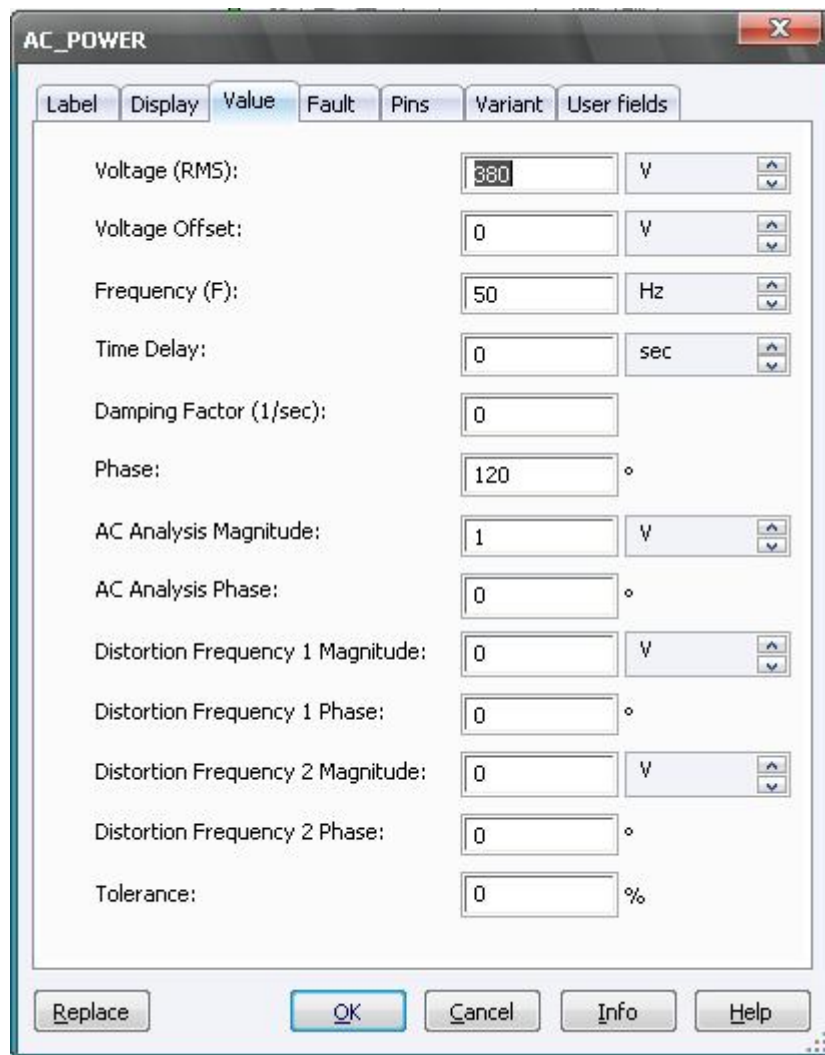


Рисунок 3.16 – Окно параметров источника переменного напряжения AC_POWER

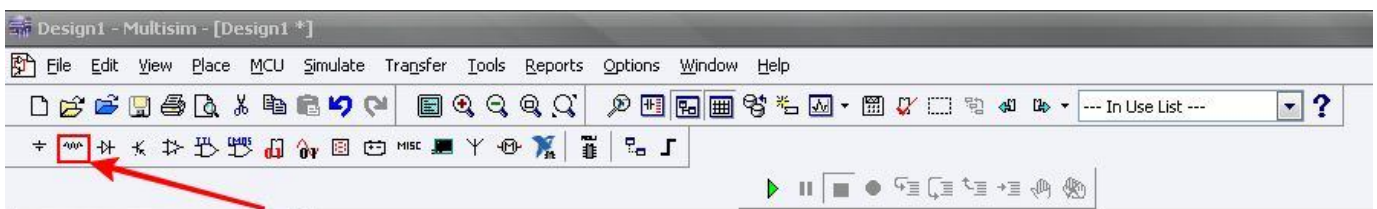


Рисунок 3.17 – Библиотека основных электрических элементов в Multisim

Теперь поговорим о моделировании взаимных индуктивностей между фазами. Для этого воспользуемся элементом INDUCTOR_COUPLING, который выбирается из библиотеки основных элементов (рис. 3.17) путем выбора в первой колонке TRANSFORMER, а во второй – INDUCTOR_COUPLING. Заходим в параметры

блока. В графе Coupled inductors list записываем через запятую названия элементов собственных индуктивностей L1,L2,L3 (см. рис. 3.19). В поле Coupling coefficient необходимо ввести значение коэффициента связи в соответствии с формулой:

$$K = \frac{L_{ab}}{L_a}, \quad (3.5)$$

ПОСКОЛЬКУ $L_{ab} = K\sqrt{L_a \cdot L_b}$, а т. к. $L_a = L_b$, то $L_{ab} = K\sqrt{L_a^2} = K \cdot L_a$.

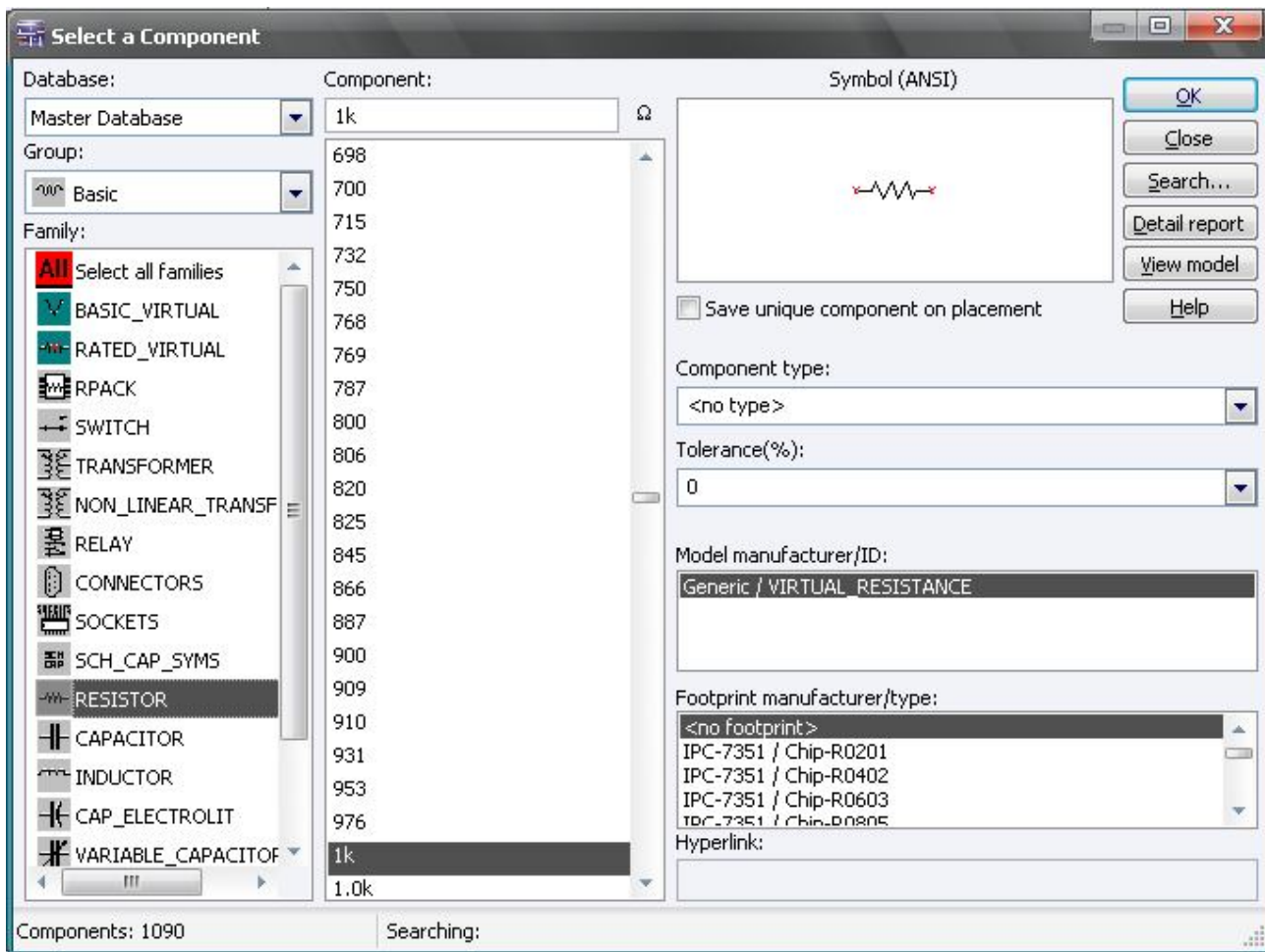


Рисунок 3.18 – Окно выбора основных электрических элементов в библиотеке источников Multisim

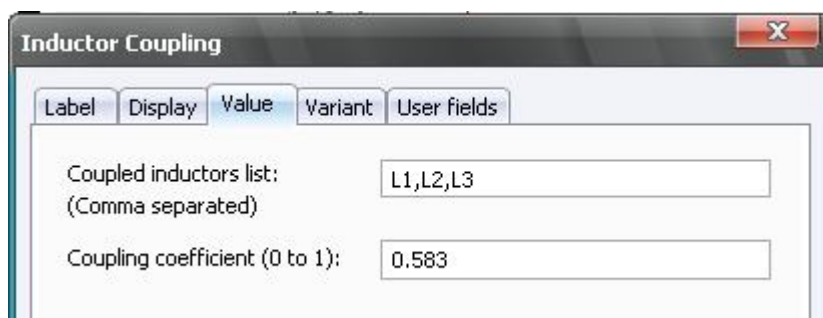


Рисунок 3.19 – Окно параметров блока формирования взаимных индуктивностей
INDUCTOR_COUPLING

Для того чтобы схема работала необходимо её заземлить. Для этого используем элемент из библиотеки источников – POWER_SOURCES -> GROUND.

Теперь осталось разобраться, как строить графики нужных нам параметров. Для того чтобы измерить ток в фазе используем амперметр. Заходим в индикаторы (см. рис. 3.20), выбираем амперметр АММЕТР (см. рис. 3.21) и в свойствах его параметров устанавливаем в поле параметра Mode – АС (переменное напряжение) (рис. 3.22). При этом значение его внутреннего сопротивления не трогаем.

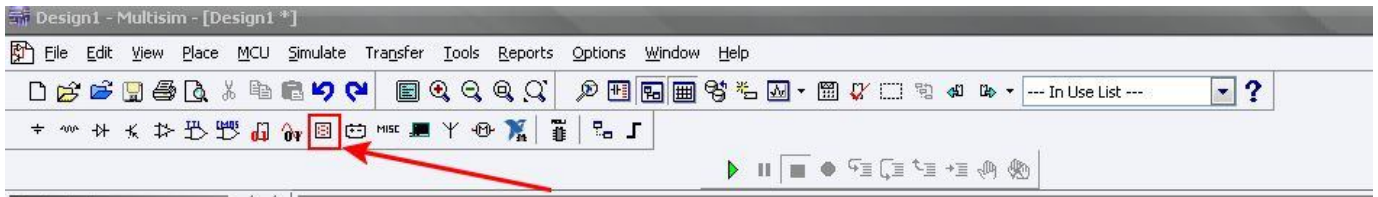


Рисунок 3.20 – Библиотека индикаторов

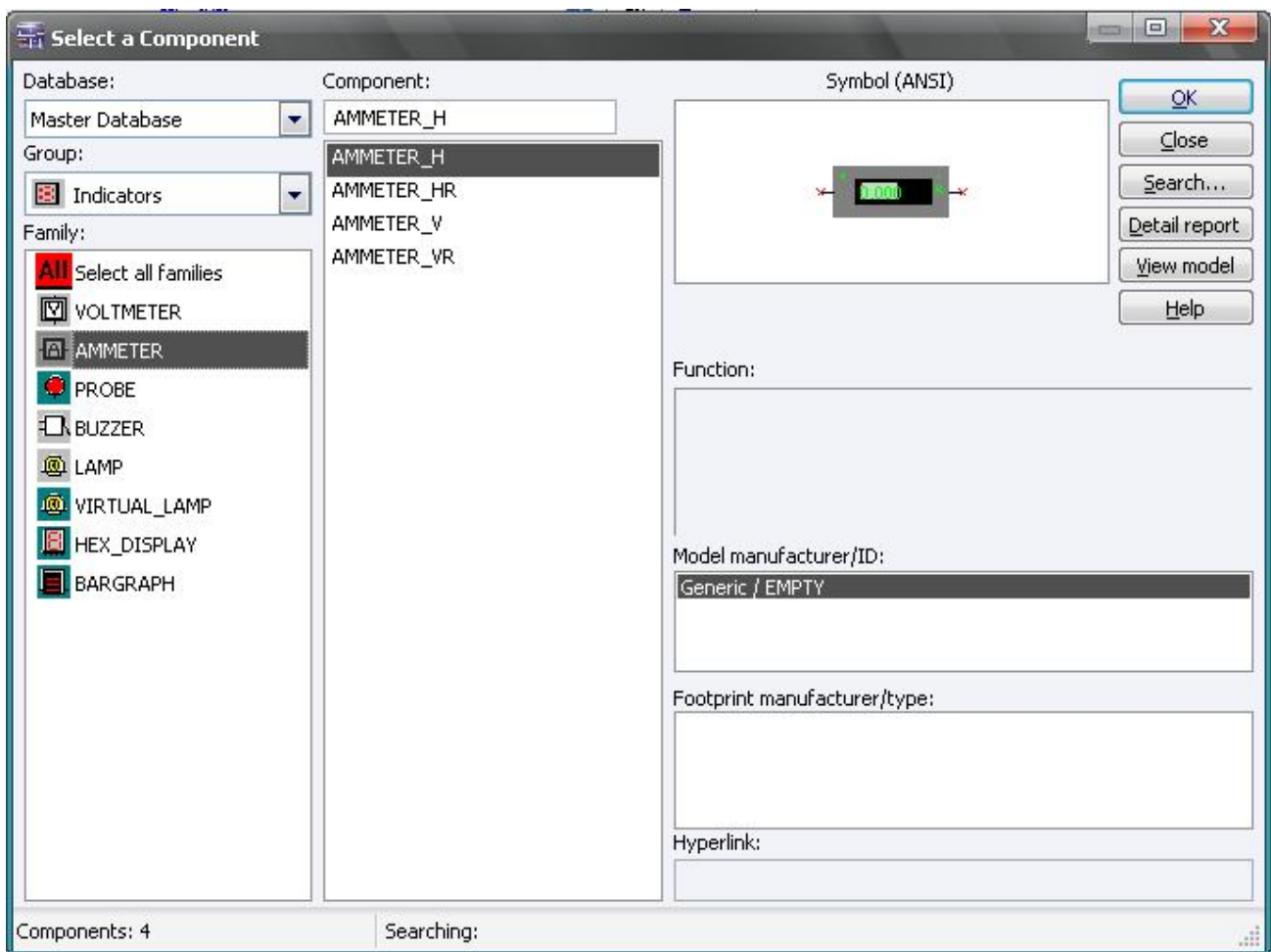


Рисунок 3.21 – Выбор амперметра из библиотеки

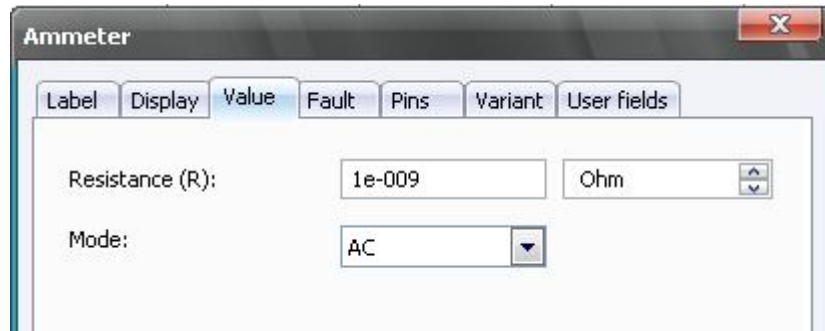


Рисунок 3.22 – Окно параметров амперметра АММЕТР

Подключаем амперметр последовательно активным сопротивлениям и индуктивностям и получаем среднеквадратичное значение тока в фазе.

Поскольку мы строим модель с источниками переменного напряжения, то для измерения напряжений нам необходим не просто вольтметр, а осциллограф, который покажет изменение напряжения в функции от времени и построит графики. Осциллограф Oscilloscope выбираем на панели справа, как показано на [рис. 3.23](#).

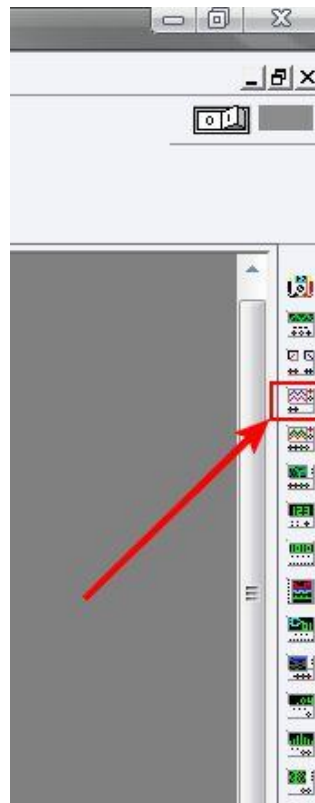


Рисунок 3.23 – Выбор осциллографа Oscilloscope

Как видим, есть возможность измерить с помощью него два падения напряжения. Подключаем, как показано на [рис. 3.13](#), измеряя, таким образом, напряжение источника питания одной фазы на первом его входе, а на втором – падение напряжения на электрической дуге.

Теперь запускаем нашу модель. Для этого производим симуляцию: нажимаем либо F5, либо значок зеленого треугольника, либо единичку на переключателе, как показано на **рис. 3.24**.

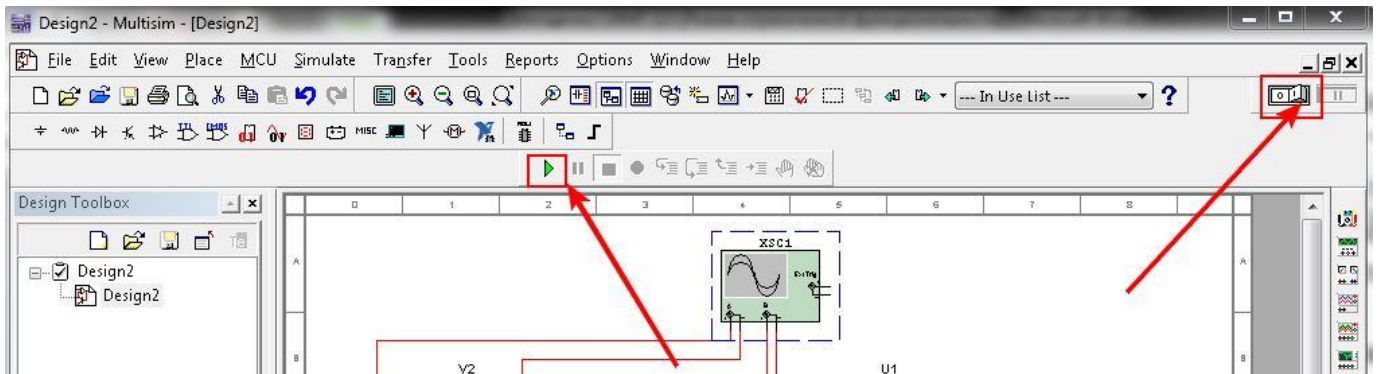


Рисунок 3.24 – Запуск модели

При этом внизу рабочего окна будет видно, как идет время симуляции (см. **рис. 3.25**).

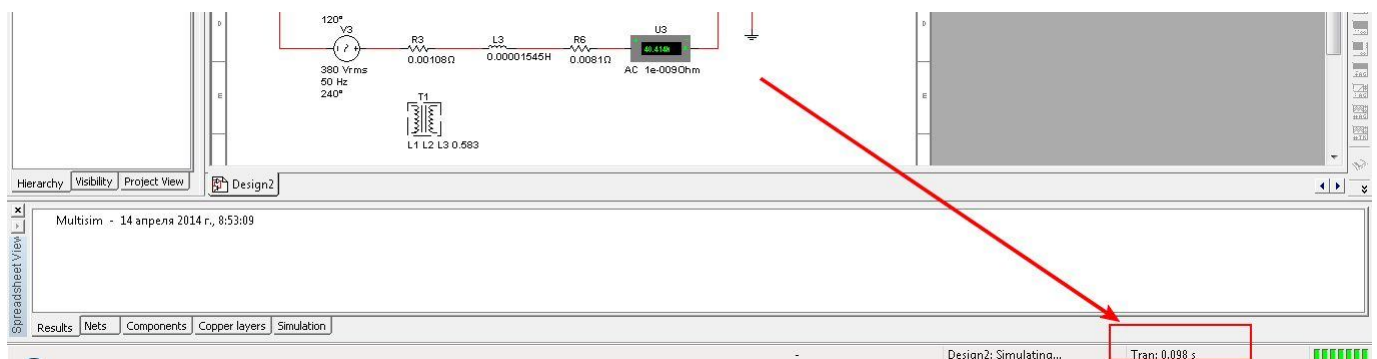


Рисунок 3.25 – Время симуляции

В процессе симуляции можно просматривать построение во времени графиков путем двойного щелчка по осциллографу (см. **рис. 3.26**).

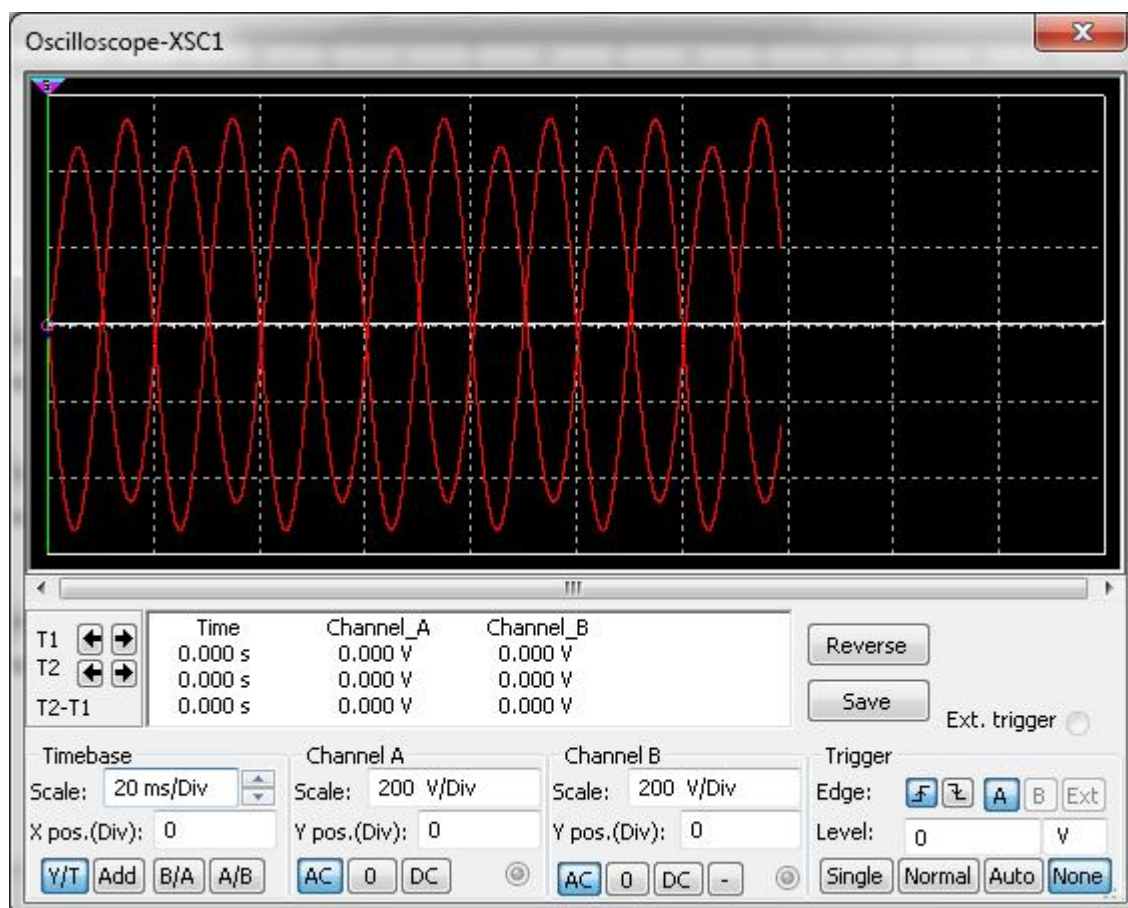


Рисунок 3.26 – Просмотрщик графиков осциллографа

При этом необходимо подогнать масштаб для удобства просмотра по оси времени (Timebase) и по амплитуде сигналов с двух каналов Channel A и Channel B. Обратите внимание, чтоб были нажаты кнопки AC в обоих каналах, соответствующие переменному напряжению.

Но для более удобного просмотра и редактирования графиков любых сигналов модели можно воспользоваться другим вариантом. Для начала заходим в меню в анализатор сигналов: Simulate -> Analyses -> Transient Analysis (см. [рис. 3.27](#)).

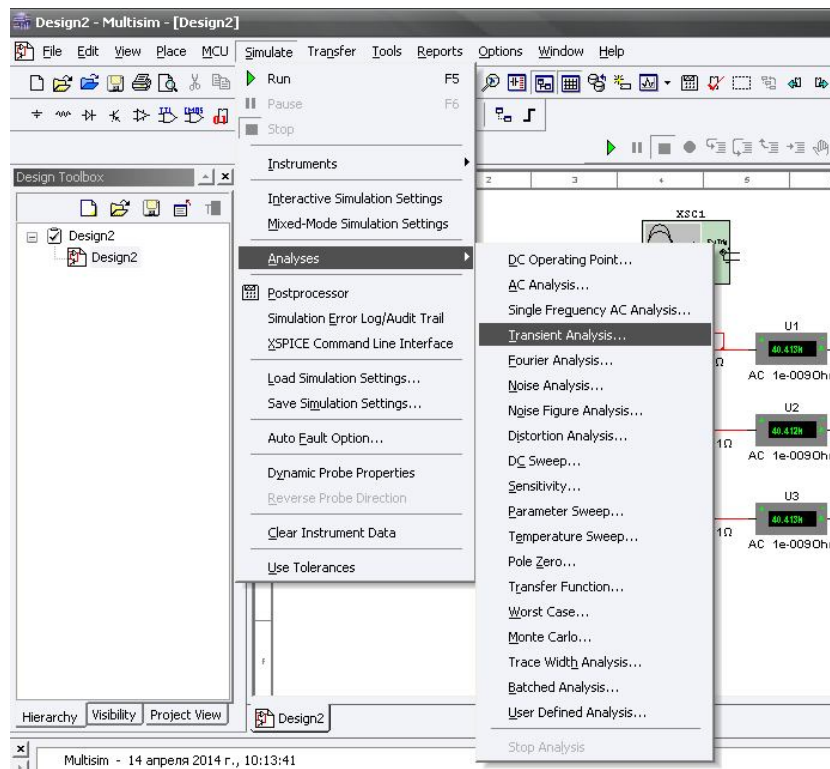




Рисунок 3.27 – Выбор анализатора сигналов Transient Analysis

Перед нами открываются параметры анализатора сигналов (см. [рис. 3.28](#)). В первой вкладке указываем временной диапазон, в котором нам необходимо построить графики. Поскольку сигналы с промышленной частотой 50 Гц имеют период колебаний 0,02 с, то с учетом этого можно указать небольшой промежуток времени, скажем, 1 с.

Во вкладке Output необходимо указать сигналы, графики которых нужно построить. Для построения, например, графиков мгновенных значений фазных токов необходимо в левом столбце Variables in circuit выбрать значения фазных токов и с помощью кнопки Add добавить их во второй столбец Selected variables for analysis (см. [рис. 3.29](#)). После чего нажимаем кнопку Simulate внизу окна параметров, и в итоге открывается окно просмотрщика графиков Grapher View на заданном диапазоне времени (см. [рис. 3.30](#)). В нем можно просмотреть подробней полученные графики: сделать белый фон, нажав значок . Также можно менять масштаб, как и в симуляторах программы MATLAB, используя кнопки . Также можно изменить названия осей и отрегулировать удобный диапазон величин, щелкнув дважды на название оси (см. [рис. 3.31](#)).

Чтобы вызвать просмотрщик Grapher View необходимо в меню выбрать View -> Grapher. Также можно в просмотрщике убрать какой-либо график. Для этого внизу окна снимается галочка напротив соответствующего сигнала (см. [рис. 3.32](#)).

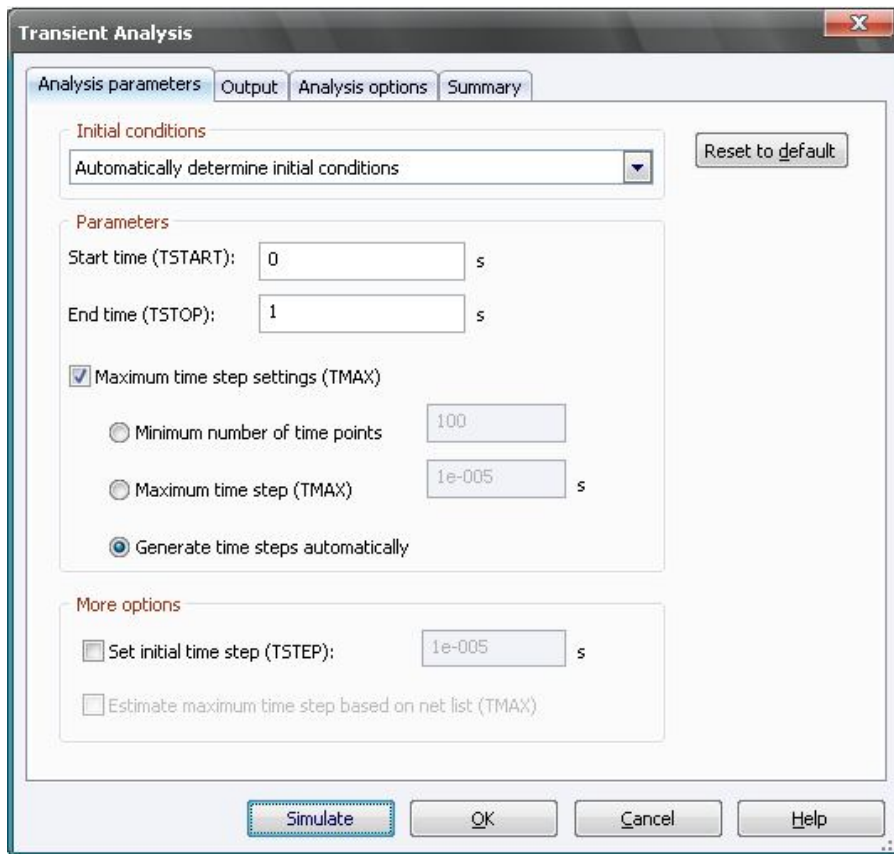


Рисунок 3.28 – Параметры анализатора сигналов Transient Analysis

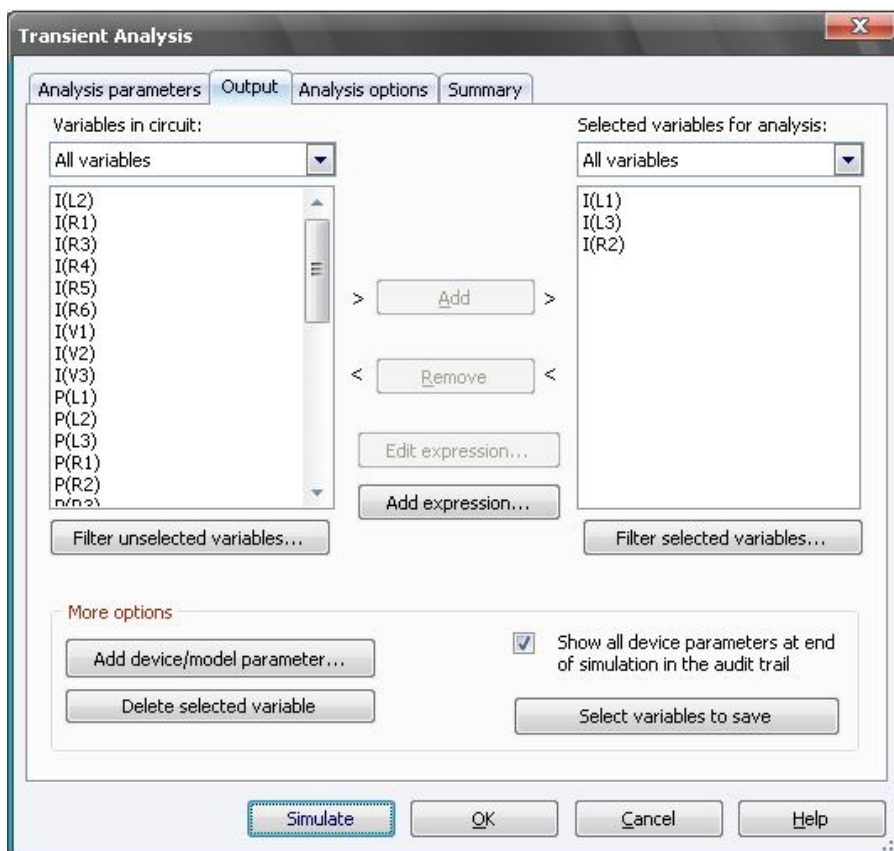


Рисунок 3.29 – Окно параметров анализатора сигналов Transient Analysis

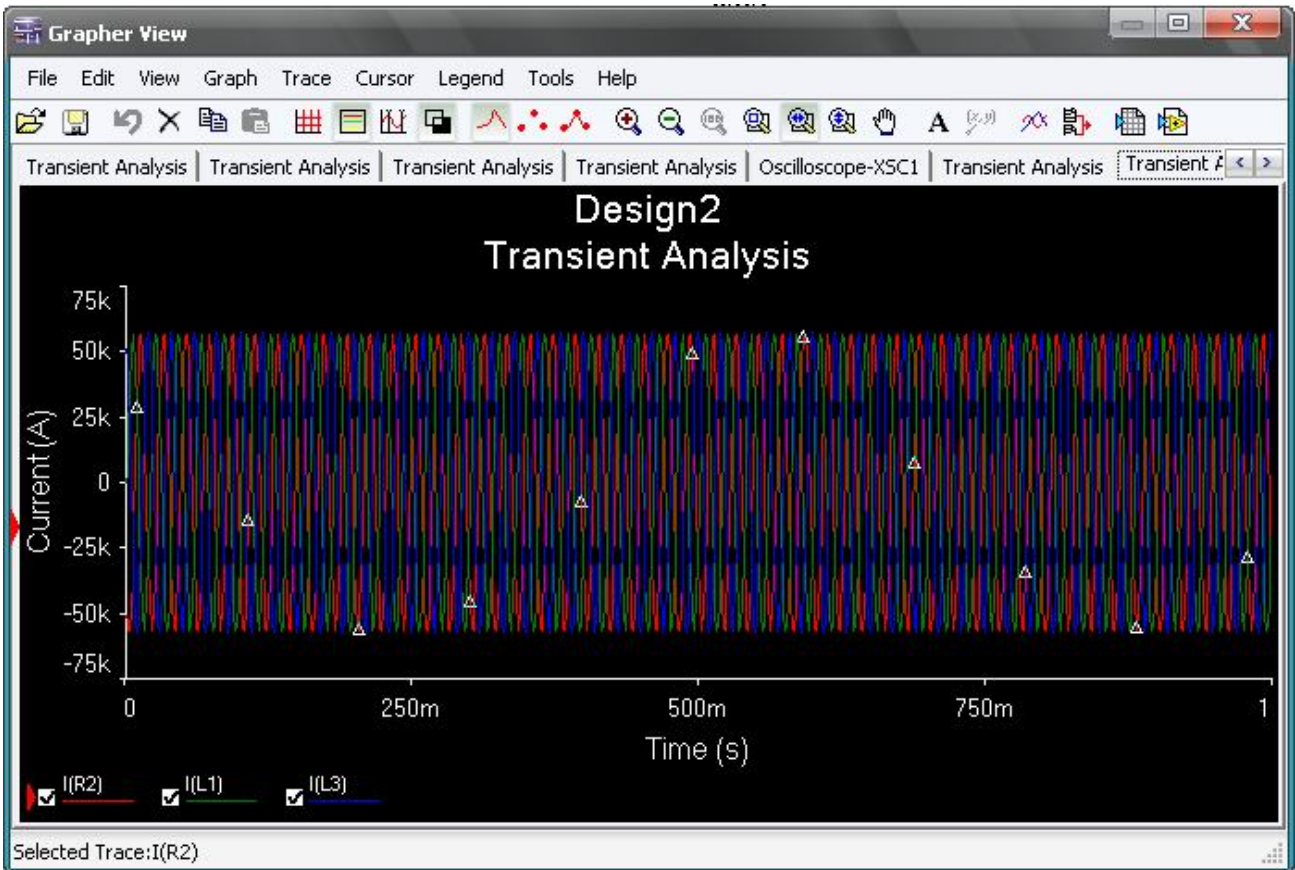


Рисунок 3.30 – Окно просмотрщика графиков Grapher View

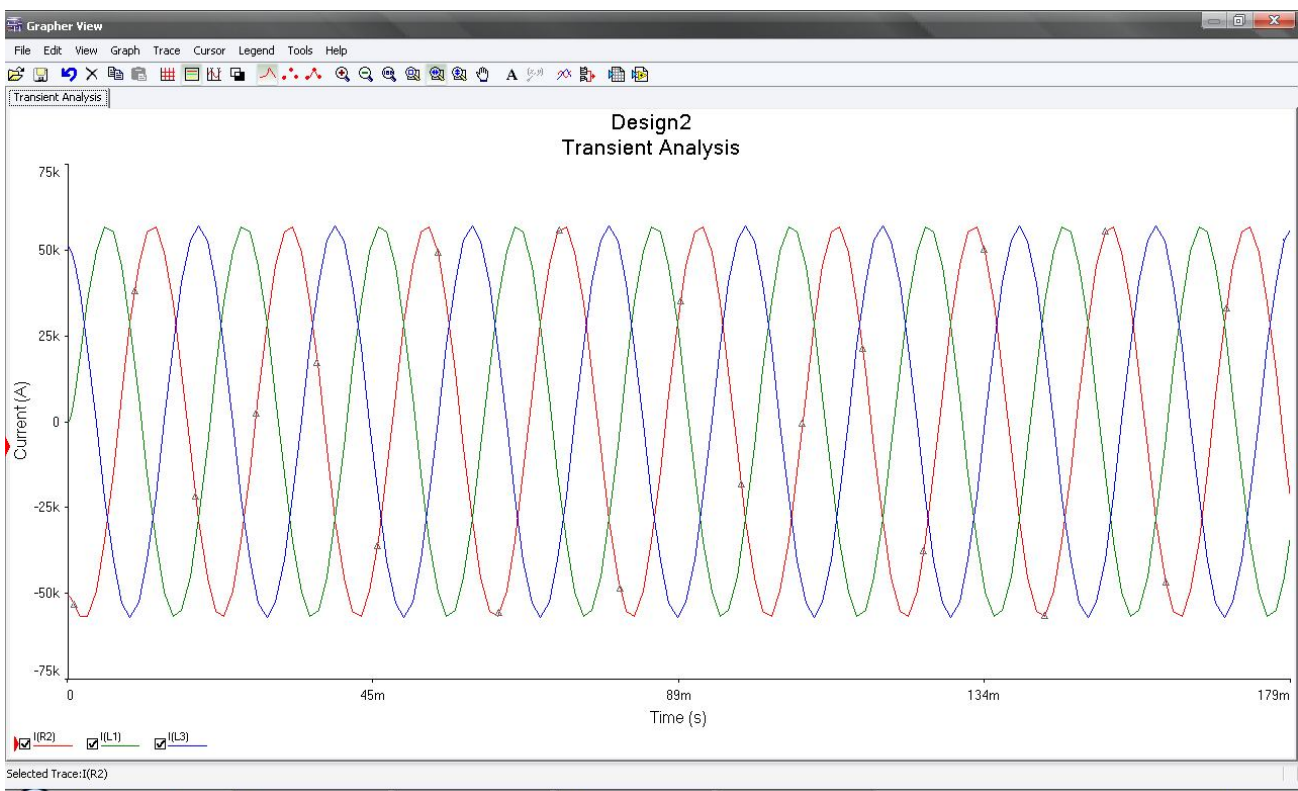


Рисунок 3.31 – Окно просмотрщика графиков Grapher View

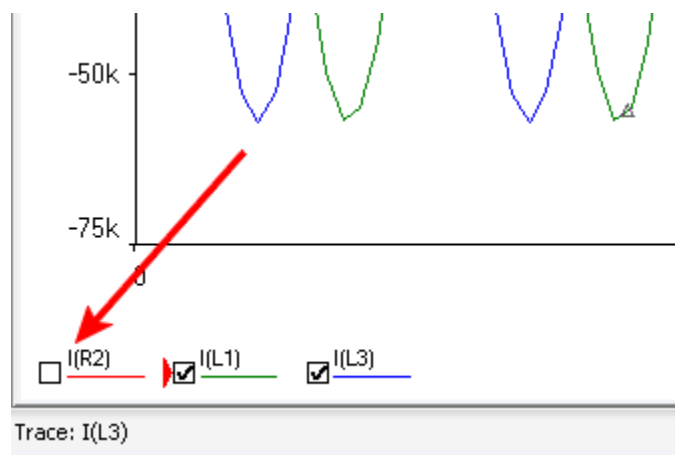


Рисунок 3.32 – Как убрать сигнал из просмотрщика

Задание

Собрать схему электрической трехфазной цепи ДСП согласно схеме на **рис. 3.13** в соответствии с вариантом задания (см. **табл. 3.1**), воспользовавшись предыдущими советами.

Поскольку сопротивление дуги точно измерить на практике невозможно, то при моделировании в нашей лабораторной работе мы будем подбирать сопротивление дуги таким, чтобы выйти на номинальный заданный ток. Поскольку в предыдущих лабораторных работах мы это уже делали, то можно сразу ставить значение сопротивления таким, как уже подобрали, и в случае необходимости подкорректировать.

В результате работы необходимо построить графики:

- напряжения источника питания;
- мгновенных значений фазных токов;
- мгновенных значений напряжений дуг.

Привести подобранное значение сопротивления дуги.

3.4 Лабораторная работа № 4. Разработка модели системы управления приводом перемещения электродов ДСП в программной среде MATLAB Simulink

Цель работы. Изучение возможностей программной среды MATLAB Simulink на примере разработки модели системы управления приводом перемещения электродов ДСП.

Как было показано ранее, система управления приводом перемещения электродов состоит из РПЭ, Рег и ППЭ.

Допустим, в качестве Рег используется пропорциональный регулятор с коэффициентом пропорциональности равным 1.

Для начала необходимо разработать модель СУ ППЭ, настроить её, а потом объединить с моделью электрической цепи ДСП и получить модель автоматизированной системы управления перемещением электродов.

Моделирование импедансного, дифференциального и токового регуляторов перемещения электродов

Токовый регулятор перемещения электрода имеет структуру, показанную на рис. 2.4. В программной среде MATLAB Simulink он моделируется, как показано на рис. 3.33.

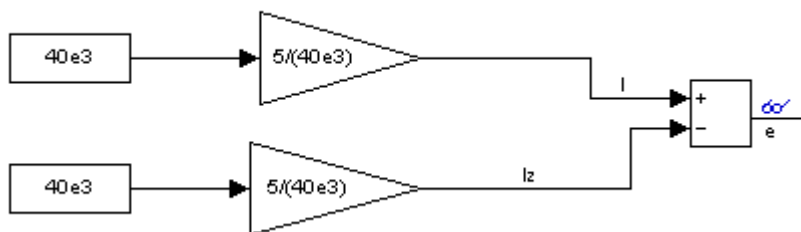


Рисунок 3.33. Структурная схема токового РПЭ

На сумматор подается сигнал тока фазы, который пока задается постоянной величиной в соответствии с вариантом. Сигнал тока масштабируется коэффициентом. Также на сумматор поступает сигнал задания – задания тока фазы. Он также масштабируется. На выходе сумматора при настройке коэффициентов масштабирования должен получиться 0. Поэтому для удобства можно сформировать сигналы 5 и -5, чтобы в сумме получился 0. Поэтому если ток фазы по Вашему варианту равен $40 \cdot 10^3$ А, то, чтобы преобразовать его в сигнал 5, необходимо, чтоб масштабируемый коэффициент был равен $5/(40 \cdot 10^3)$. Тогда на первый вход сумматора поступит сигнал $40 \cdot 10^3 \cdot 5/(40 \cdot 10^3) = 5$.

Для задатчика тока рассуждаем аналогично.

Таким образом, Вы должны проконтролировать входные и выходной сигналы сумматора. Выходной сигнал (сигнал рассогласования) должен быть равен нулю.

Дифференциальный регулятор перемещения электрода имеет структуру, показанную на рис. 2.5. В программной среде MATLAB Simulink он моделируется, как показано на рис. 3.34.

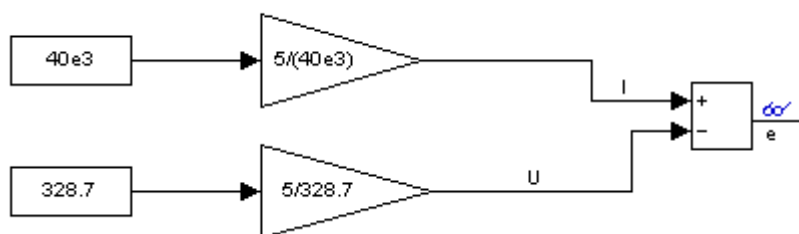


Рисунок 3.34. Структурная схема дифференциального РПЭ

На сумматор подаются сигнал тока и сигнал напряжения дуги, которые пока задаются постоянными величинами в соответствии с вариантом. Сигнал тока и сигнал напряжения масштабируются коэффициентами. На выходе сумматора при

настройке коэффициентов масштабирования должен получиться 0. Поэтому для удобства можно сформировать сигналы 5 и -5, чтобы в сумме получился 0. Поэтому если ток фазы по Вашему варианту равен $40 \cdot 10^3$ А, то, чтобы преобразовать его в сигнал 5, необходимо, чтоб масштабируемый коэффициент был равен $5/(40 \cdot 10^3)$. Тогда на первый вход сумматора поступит сигнал $40 \cdot 10^3 \cdot 5/(40 \cdot 10^3) = 5$.

Для сигнала напряжения дуги рассуждаем аналогично.

Таким образом, Вы должны проконтролировать входные и выходной сигналы сумматора. Сигнал рассогласования должен быть равен нулю.

Импедансный регулятор перемещения электрода имеет структуру, показанную на рис. 2.6. В программной среде MATLAB Simulink он моделируется, как показано на рис. 3.35.

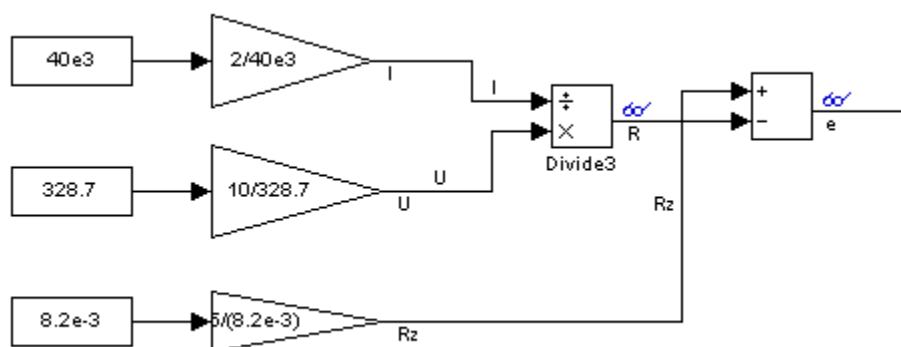


Рисунок 3.35. Структурная схема импедансного РПЭ

На сумматор подаются сигнал импеданса дуги R и сигнал задания импеданса дуги Rz. Для того чтобы сформировать импеданс дуги, необходимо напряжение дуги U поделить на ток дуги I. Задаем пока эти параметры для настройки в виде постоянных величин в соответствии с Вашим вариантом. Допустим, ток равен $40 \cdot 10^3$ А, а напряжение дуги равно 328,7 В. Вернемся к сумматору. Для того чтобы на его выходе получить сигнал рассогласования (ошибку) равной 0, для удобства можно сформировать сигнал текущего импеданса и сигнал задания импеданса равными 5. Для того чтоб его получить, необходимо, как уже было сказано ранее, напряжение дуги поделить на ток дуги. Чтобы их отношение было равным 5, необходимо масштабирующие коэффициенты настроить так, чтобы на их выходе, были сигналы, соответственно, 10 и 2.

Если ток фазы по Вашему варианту равен $40 \cdot 10^3$ А, то чтобы преобразовать его в сигнал 2, необходимо, чтоб масштабируемый коэффициент был равен $2/(40 \cdot 10^3)$.

Если, к примеру, напряжение дуги равно 328,7 В, а на выходе масштабирующего коэффициента, Вам нужно получить 10, то коэффициент должен быть равен $10/328,7$. Тогда в итоге на выходе блока деления будет сигнал $10/2 = 5$.

Для сигнала задания импеданса дуги рассуждаем аналогично.

Импеданс – отношение напряжения дуги к току дуги, то есть $328,7/40 \cdot 10^3 = 8,2 \cdot 10^{-3}$ Ом. Поэтому в качестве задания импеданса устанавливается $8,2 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Таким образом, Вы должны проконтролировать входные и выходной сигналы сумматора. Выходной сигнал рассогласования должен быть равен нулю.

Моделирование электрогидравлического привода перемещения электродов

Теоретическая часть

Как изображено на **рис. 2.8 и 2.9**, электрогидравлический привод перемещения электродов ДСП состоит из пропорционального электромагнита, распределителя и гидроцилиндра. А система управления приводом перемещения электродов состоит из РПЭ, Рег и ППЭ.

Пропорциональный электромагнит. Линейным двигателем для управления сменой рабочих позиций гидрораспределителя ДСП является, как правило, пропорциональный электромагнит. Пропорциональный электромагнит служит для управления позициями гидрораспределителя (с электромагнитным управлением) путем преобразования электрического сигнала управления в механическое перемещение входного звена распределительного устройства.

В работе [105] предлагается моделировать электромагнит одним блоком – инерционным звеном (учитывая только электрическую его часть), передаточная функция которого определяется следующим образом:

$$W_{ПЭМ}(p) = W_{\gamma}(p) = \frac{x_{засл}(p)}{U_{\gamma}(p)} = \frac{K_{\gamma}}{T_{\gamma}p + 1} = \frac{0,002}{0,02p + 1},$$

где $x_{засл}$ – перемещение якоря; U_{γ} – сигнал с выхода регулятора (сигнал управления); K_{γ} – коэффициент передачи электрической части линейного двигателя,

$$k_{\gamma} = \frac{I_i}{U_i} = \frac{0,02}{10} = 0,002 \hat{I} \hat{i}^{-1};$$

где I_n, U_n – ток якоря и напряжение управления электромагнитом; T_{γ} – электрическая постоянная якоря линейного двигателя,

$$T_{\gamma} = \frac{L}{R} = \frac{1,57}{70} = 0,02 \text{ } \hat{n},$$

где L – индуктивность катушки, $L = 1,57 \hat{A} \hat{i}$; R – активное сопротивление катушки, $R = 70 \hat{I} \hat{i}$.

Гидравлический распределитель. Гидравлический распределитель состоит из гидравлического моста и цилиндрического золотника.

Например, пропорциональный гидрораспределитель 4WRLE 16 V1-150 P-3X/G24KO/A1M фирмы Bosch Rexroth имеет следующие характеристики:

- номинальное давление: $32 \cdot 10^6$ Па;

- давление управления в камере потенциометров: $1,2 \cdot 10^6$ Па;
- диаметр сопла: $0,4 \cdot 10^{-3}$ м.
- максимальный ход заслонки: $0,4 \cdot 10^{-3}$ м.
- диаметр золотника: $9 \cdot 10^{-3}$ м.
- максимальное смещение золотника: $1 \cdot 10^{-3}$ м.
- коэффициент обратной связи усилителя: 0,4.
- масса золотника: 1 кг.

Определение передаточной функции гидравлического моста

$$W_{\dot{a}i}(Ps) = \frac{L\zeta(Ps)}{\tilde{O}(Ps)} = \frac{K\dot{i}}{T_{\dot{a}i}^2 Ps^2 + 2\varepsilon T_{\dot{a}i} \dot{D}_s + 1},$$

где $K\dot{i}$ – коэффициент передачи, $T_{z\dot{m}}$ – постоянная времени моста; ζ – коэффициент демпфирования колебаний.

Определим значения величин, входящих в передаточную функцию гидравлического моста.

Коэффициент передачи гидравлического моста составит:

$$\hat{E}_i = \frac{K_p S_c}{\hat{E}_D \hat{E}_{i\dot{n}} S_c + \hat{E}_{\dot{a}} \tilde{N}_{\dot{a}i}}.$$

где \hat{E}_D – коэффициент усиления по расходу,

$$K_p = \frac{Q_c}{X_o} = \mu \pi d_c \sqrt{\frac{2}{\rho}} P_k = 0,7 \cdot 3,14 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \times \\ \times \sqrt{\frac{2}{885} \cdot 10^6} = 0,167 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{c},$$

где μ – коэффициент вязкости жидкости, $\mu = 0,7$; d_c – диаметр сопла, $d_c = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м; ρ – плотность рабочей жидкости, $\rho = 885 \text{ Нс}^2/\text{м}^4$; P_k – давление управления в камере потенциометров, $P_k = 1 \cdot 10^6$ Па; $\hat{E}_{\dot{a}}$ – коэффициент усиления по давлению,

$$\hat{E}_{\dot{a}} = \frac{Q_c}{\dot{D}_{\dot{a}}} = \frac{K_p \cdot x_o}{\dot{D}_{\dot{a}}} = \frac{0,0417 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^6} = 0,167 \cdot 10^{-10} \frac{i^5}{\dot{i} \cdot \dot{n}},$$

где x_o – максимальный ход заслонки, $x_o = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м; $\hat{E}_{i\dot{n}}$ – коэффициент обратной связи,

$$\hat{E}_{i\dot{n}} = \frac{\tilde{O}_{\dot{i}}^i \dot{a}\ddot{o}}{L^i \dot{a}\ddot{o}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,4;$$

S_3 – площадь торца золотника,

$$S_{\zeta} = \frac{\pi \cdot d_{\zeta}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (9 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,636 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где d_{ζ} – диаметр золотника, $d_{\zeta} = 9 \cdot 10^{-3}$ м; C_{ζ} – жёсткость струи потока в щели золотника,

$$\tilde{N}_{\dot{A}\dot{A}} = 0,964 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot (17,55 - 16,1) \cdot 10^6 = 39600 \frac{\dot{I}}{\dot{i}},$$

где P_a – давление на выходе из насоса, $P_a = 17,55$ МПа; P – полезный перепад давлений, $P = 16,1$ МПа.

Определим постоянную времени гидравлического моста:

$$T_{ГМ} = \sqrt{\frac{K_{\delta} \cdot m_{\zeta}}{K_p \cdot K_{oc} \cdot S_{\zeta} + K_{\delta} \cdot C_{\zeta}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,167 \cdot 10^{-10} \cdot 1}{0,0417 \cdot 0,4 \cdot 0,636 \cdot 10^{-4} + 0,167 \cdot 10^{-10} \cdot 39600}} = 0,00312 \text{ с},$$

где m_{ζ} – масса золотника, $m_{\zeta} = 1$ кг.

Относительный коэффициент демпфирования колебаний:

$$\xi = \frac{S_{\zeta}^2 + K_{\delta} \cdot f}{2 \sqrt{K_{\delta} m_{\zeta} (K_p \cdot K_{oc} \cdot S_{\zeta} + K_{\delta} \cdot C_{\zeta})}} =$$

$$= \frac{(0,636 \cdot 10^{-4})^2 + 0,167 \cdot 10^{-10} \cdot 1,5 \cdot 10^4}{2 \sqrt{0,167 \cdot 10^{-10} \cdot 1 \cdot (0,0417 \cdot 0,4 \cdot 0,636 \cdot 10^{-4} + 0,167 \cdot 10^{-10} \cdot 39600)}} = 2,76,$$

где f – коэффициент вязкого трения, $f = 1,5 \cdot 10^3$ Нс/м.

Таким образом, передаточная функция гидравлического моста имеет вид:

$$W_{\dot{A}\dot{A}}(\delta) = \frac{1,54}{9,74 \cdot 10^{-6} \delta^2 + 0,0172 \delta + 1}.$$

Определение передаточной функции золотника:

$$W_{\zeta}(Ds) = \frac{Q_{\zeta}(Ds)}{L_{\zeta}(Ds)} = K_{\zeta}.$$

Значение K_{ζ} определяется:

$$\hat{E}_{\zeta} = \frac{Q}{L_{\zeta}} = \frac{1,62 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,162 \frac{\dot{i}^2}{\dot{n}},$$

где Q – подводимый к гидрораспределителю расход, $Q = 1,62 \cdot 10^{-4} \frac{i^3}{\tilde{n}}$; ℓ_ζ – перемещение золотника, $\ell_\zeta = 1 \cdot 10^{-3} i$.

Исполнительным органом регулятора является *гидроцилиндр* со следующими параметрами:

- эффективная площадь поршня цилиндра со стороны нагнетательной полости: $0,25 \text{ м}^2$;
- длина рабочего хода цилиндра: $4,5 \text{ м}$;
- масса подвижных частей гидроцилиндра и рабочего органа: $4,8 \text{ кг}$.

Гидроцилиндр имеет следующую передаточную функцию:

$$W_{ГЦ}(p) = \frac{K_{гц}}{p(T_{гц} p^2 + 2\xi T_{гц} p + 1)},$$

где $K_{ГЦ}$ – коэффициент усиления гидроцилиндра,

$$K_{ГЦ} = \frac{1}{S_B} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ м}^{-2},$$

где S_A – эффективная площадь поршня гидроцилиндра со стороны полости нагнетания, $S_A = 0,25 i^2$.

Определим постоянная времени гидроцилиндра

$$T_{ГЦ} = \sqrt{\frac{m}{C_{ГЦ}}} = \sqrt{\frac{4,8}{5200}} = 0,03 \text{ с},$$

где m – масса подвижных частей (поршня со штоком и рабочего органа машины), $m = 4,8 \text{ кг}$; $C_{ГЦ}$ – коэффициент динамической жёсткости гидроцилиндра,

$$C_{ГЦ} = \frac{2 \cdot S_B \cdot E_{np}}{L_{ГЦ}} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 46800}{4,5} = 5200 \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

где S_B – эффективная площадь поршня цилиндра со стороны нагнетательной полости, $S_B = 0,25 \text{ м}^2$; E_{np} – приведённый модуль упругости стенок корпуса гидроцилиндра и рабочей жидкости, $E_{np} = 46800 \text{ Н/м}^2$; $L_{ГЦ}$ – длина рабочего хода цилиндра, $L_{ГЦ} = 4,5 \text{ м}$.

Определим относительный коэффициент демпфирования колебаний:

$$\xi = \frac{f}{2 \cdot \sqrt{C_{ГЦ} \cdot m}} = \frac{1,5 \cdot 10^4}{2 \cdot \sqrt{5200 \cdot 4,8}} = 4,747,$$

где f – приведённый коэффициент вязкого трения, $f = 1,5 \cdot 10^4$.

Таким образом, передаточная функция гидроцилиндра имеет вид:

$$W_{ГЦ}(p) = \frac{4}{p(0,0009p^2 + 0,28p + 1)}$$

Практическая часть

С учетом настройки РПЭ и расчетов передаточных функций всех элементов системы можно приступить к ее моделированию.

Структурная схема модели СУ электрогидравлическим ППЭ с токовым РПЭ для одной фазы будет иметь вид, как показано на [рис. 3.36](#).

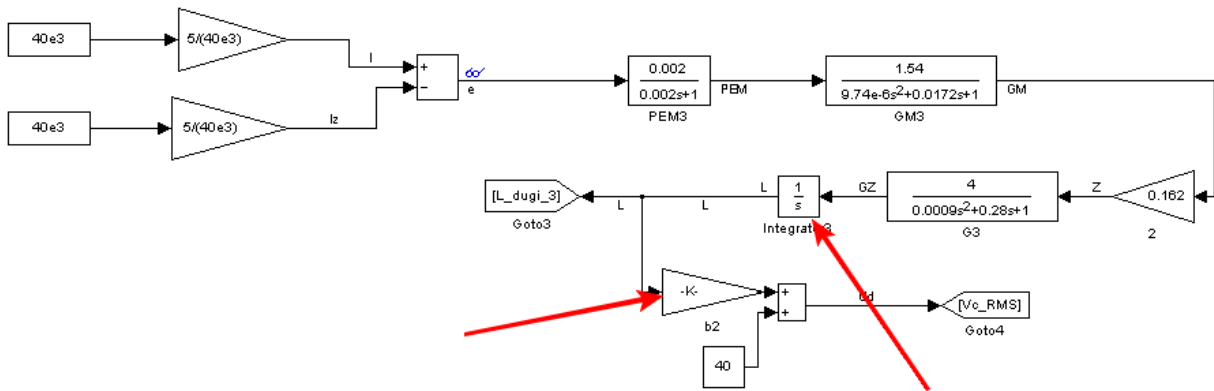


Рисунок 3.36. Структурная схема модели СУ электрогидравлическим ППЭ с токовым РПЭ для одной фазы

Структурная схема модели СУ электрогидравлическим ППЭ с дифференциальным РПЭ для одной фазы приведена на [рис. 3.37](#).

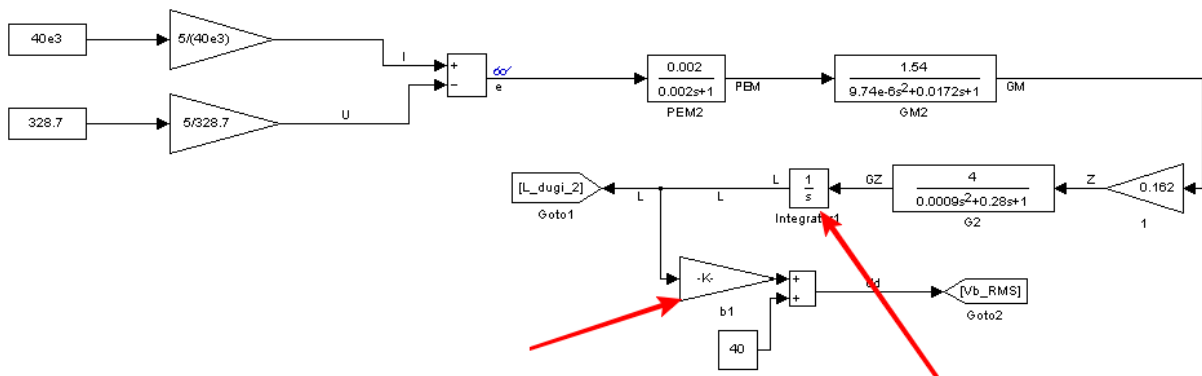


Рисунок 3.37. Структурная схема модели СУ электрогидравлическим ППЭ с дифференциальным РПЭ для одной фазы

Структурная схема модели СУ электрогидравлическим ППЭ с импедансным РПЭ для одной фазы приведена на [рис. 3.38](#).

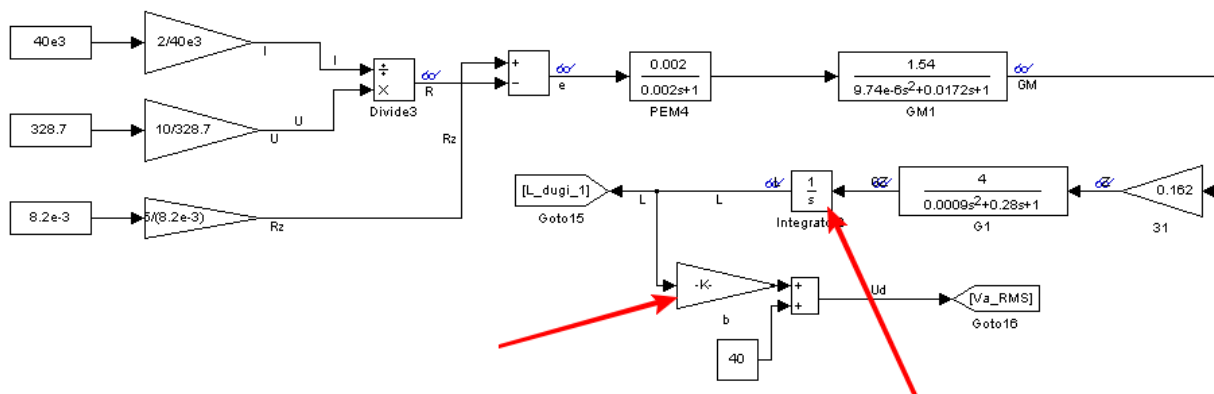


Рисунок 3.38. Структурная схема модели СУ электрогидравлическим ППЭ с импедансным РПЭ для одной фазы

Как видно из [рис. 3.36-3.38](#) длина дуги заносится в специальный блок Goto, который будет хранить значение длины дуги в памяти MatLab. В дальнейшем если нужно будет использовать данный сигнал, то чтобы не вести соединительные линии, достаточно воспользоваться блоком From.

С помощью интегратора, на который указывает стрелочка на рисунках, необходимо настроить значение длины дуги в соответствии со своим вариантом.

Преобразование длины дуги в действующее напряжение дуги производится по формуле (2.1). При этом задаем коэффициент $\alpha = 40 \text{ В}$. А коэффициент β , на который указывает стрелочка на рисунках, Вам необходимо будет подобрать таким, чтобы выйти на необходимое напряжение дуги, которое Вы получили при моделировании электрической цепи ДСП и подали на вход РПЭ. Это значение также можно внести в память MatLab при помощи блока Goto.

Задание

Собрать модель СУ ППЭ ДСП согласно схеме на [рис. 3.36-3.38](#) в соответствии с вариантом задания (см. [табл. 3.2](#)), воспользовавшись предыдущими советами.

В результате лабораторной работы необходимо:

- настроить масштабирующие коэффициенты для Вашего РПЭ и привести их значения;
- получить сигнал рассогласования на выходе сумматора равным 0 и подтвердить это построением его графика;
- с помощью интегратора настроить значение длины дуги в соответствии с вариантом и построить график ее изменения;
- подобрать коэффициент β , чтобы выйти на нужное напряжение дуги и привести график изменения напряжения дуги.

Таблица 3.2. Варианты заданий

№ варианта	Тип РПЭ	Длина дуги, м
1	Токовый	0,1
2	Дифференциальный	0,2
3	Импедансный	0,3
4	Токовый	0,4
5	Дифференциальный	0,5
6	Импедансный	0,6
7	Токовый	0,1
8	Дифференциальный	0,2
9	Импедансный	0,3
10	Токовый	0,4
11	Дифференциальный	0,5
12	Импедансный	0,6
13	Токовый	0,1
14	Дифференциальный	0,2
15	Импедансный	0,3
16	Токовый	0,4

Лабораторная работа № 5. Разработка модели автоматизированной системы управления перемещением электродов ДСП в программной среде MATLAB Simulink

Цель работы. Изучение возможностей программной среды MATLAB Simulink на примере разработки модели автоматизированной системы управления перемещением электродов ДСП.

Теперь необходимо соединить две модели: модель электрической цепи ДСП (рис. 3.2) и разработанную в предыдущей работе модель СУ ППЭ (рис. 3.36-3.38), и получить модель автоматизированной системы управления перемещением электродов ДСП.

Для этого вместо постоянных значений тока и напряжения дуги, которые мы подавали на РПЭ, необходимо подать сигналы из модели электрической цепи ДСП. Для этого удобно воспользоваться блоками Goto и From, которые были описаны в предыдущей работе.

Поскольку в модели электрической цепи ДСП мы оперировали мгновенными значениями токов и напряжений (с промышленной частотой 50 Гц), а в модели СУ ППЭ ДСП используются выпрямленные среднеквадратические (действующие) значения токов и напряжений, то для начала мгновенные значения необходимо преобразовать в действующие. Это производится с помощью комплексного блока-подсистемы Subsystem из Simulink-библиотеки, которую необходимо создать и заполнить (см. рис. 3.39).

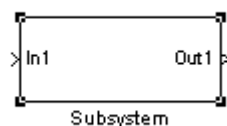


Рисунок 3.39. Комплексный блок-подсистема Subsystem

Зайдите в него двойным щелчком левой кнопкой мыши и перед Вами откроется область для создания модели подсистемы (см. [рис. 3.40](#)), в которой имеется вход In1 и выход Out1. Число входов и выходов может быть разное, но в нашем случае оставляем по одному.

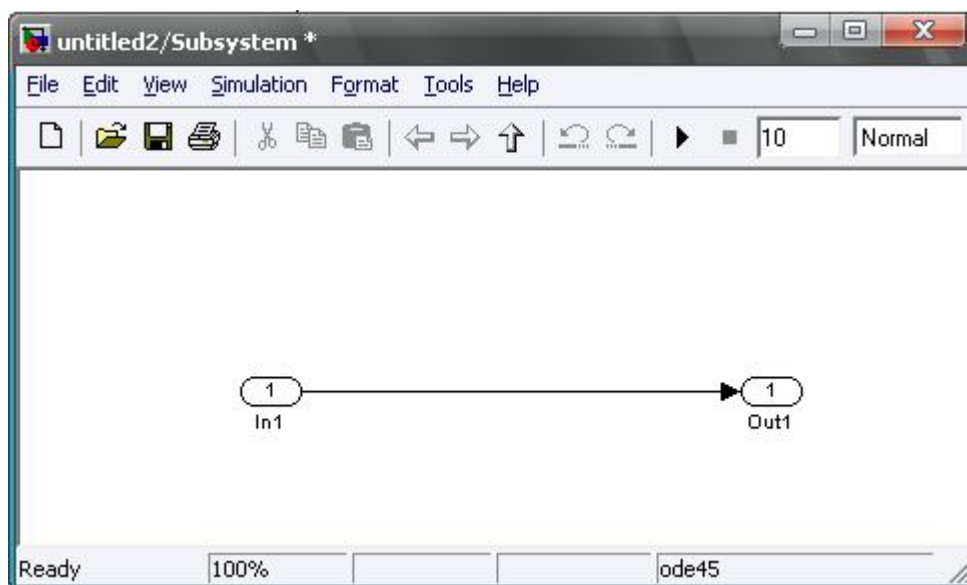


Рисунок 3.40. Рабочая область блока Subsystem

То есть в нашем случае на вход In1 мы будем подавать мгновенное значение сигнала тока (или напряжения) дуги, а на выходе Out1 сформируем действующее значение тока (или напряжения) дуги.

Теперь необходимо в область блока Subsystem добавить нужные для преобразования элементы (см. [рис. 3.41](#)).

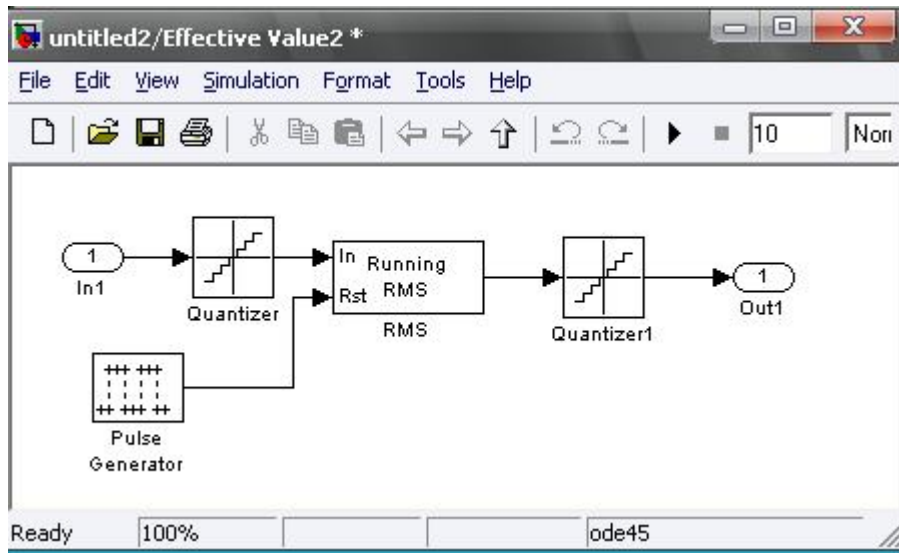


Рисунок 3.41. Рабочая область блока Subsystem

Настраиваем каждый блок в соответствии с [рис. 3.42-3.44](#).

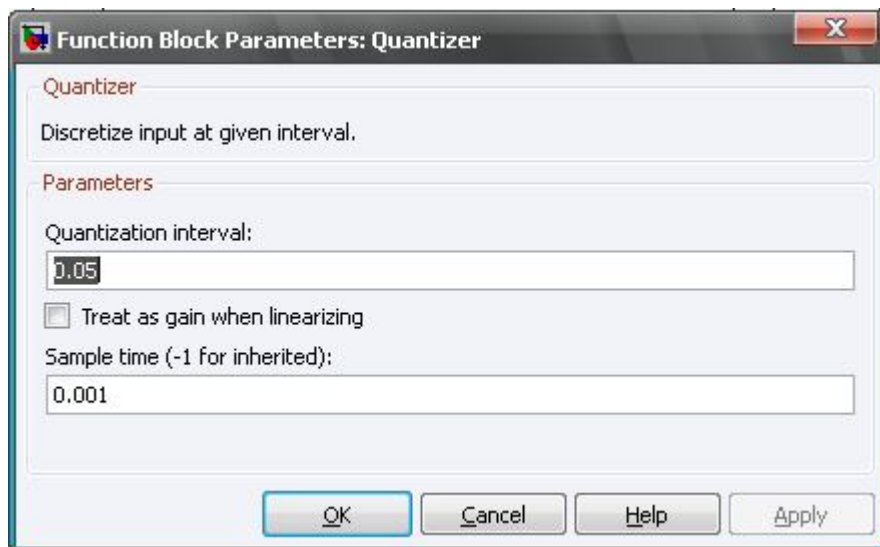


Рисунок 3.42. Параметры блока Quantizer

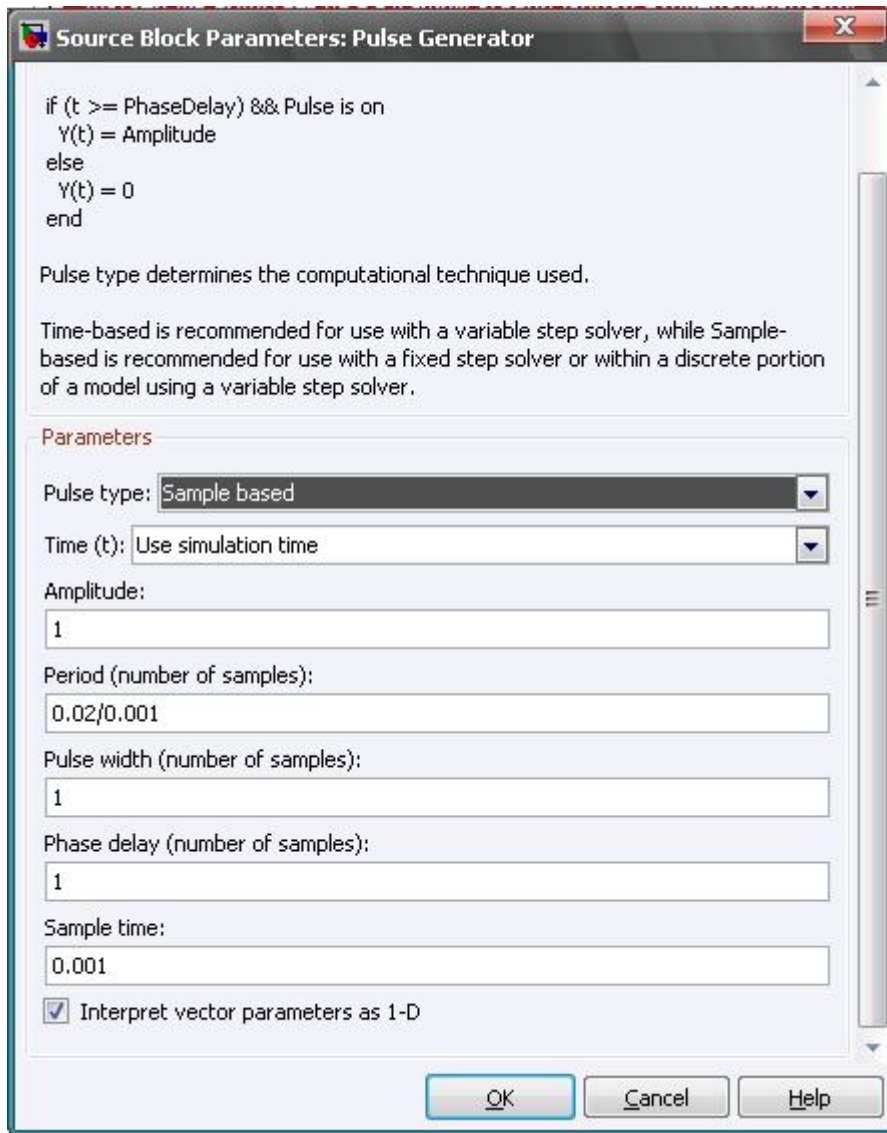


Рисунок 3.43. Параметры блока Pulse Generator

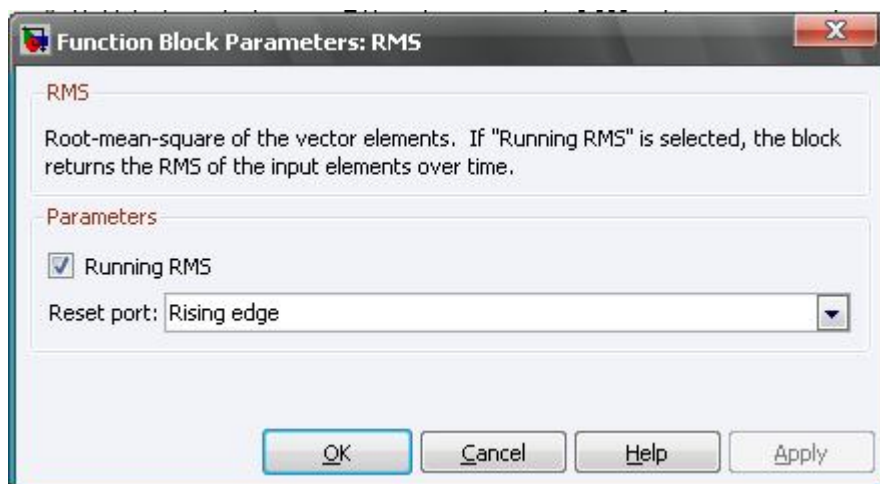


Рисунок 3.44. Параметры блока Pulse RMS

Открываем модель электрической системы ДСП. Поскольку мы создавали модель СУ ППЭ для одной фазы, то для подачи на РПЭ среднеквадратических

значений тока и напряжения дуги, необходимо выделить эти сигналы для одной из фаз (см. рис. 3.45).

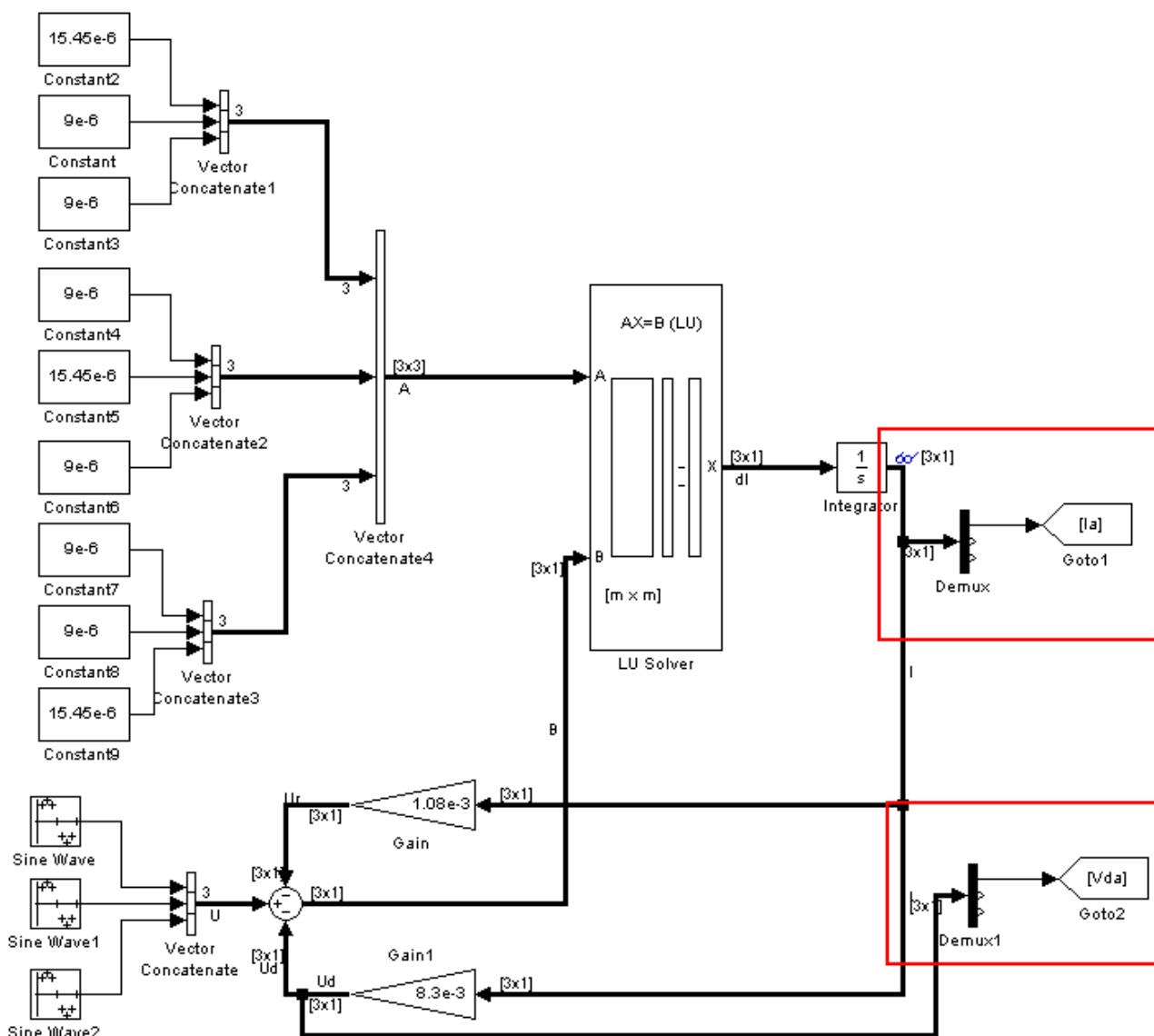


Рисунок 3.45. Выделение тока и напряжения дуги одной фазы

Теперь копируем в этот файл, где разработана модель электрической цепи ДСП, модель СУ ППЭ из предыдущей работы. И вместо постоянных значений тока и напряжения дуги ставим реальные из модели электрической цепи ДСП (см. рис. 3.46).

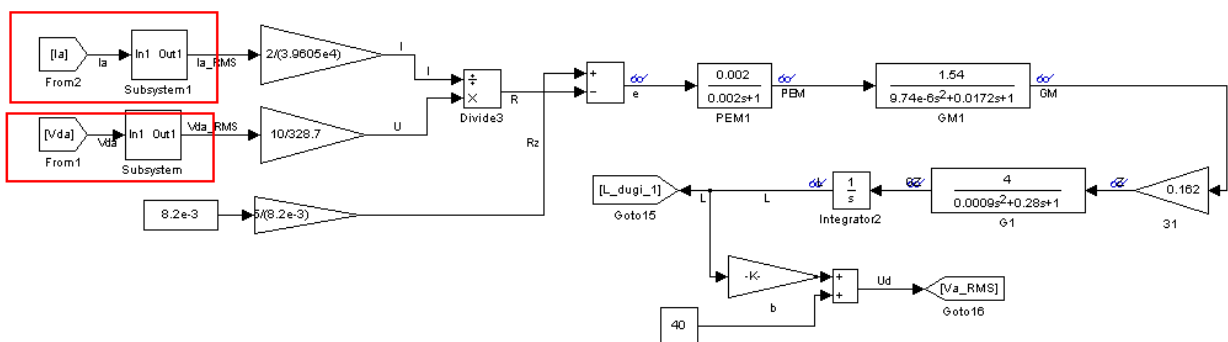


Рисунок 3.46. Модель СУ ППЭ ДСП с реальными током и напряжением дуги из модели электрической цепи ДСП

В результате работы необходимо:

- повторно проверить сигналы на выходе масштабирующих коэффициентов;
- повторно проверить сигнал рассогласования, который должен быть равен 0 и построить его график для проверки;
- повторно проверить сигнал действующего значения напряжения дуги после преобразования его от длины дуги и привести его график;
- построить график напряжения источника питания;
- построить график мгновенных значений фазных токов;
- построить график действующих значений фазных токов;
- построить график мгновенных значений напряжений дуг;
- построить график действующих значений фазных токов;
- построить график длины дуги.