Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
Кафедра электрических станций

Паспорт
расчетно-графического задания

по дисциплине «Создание цифровых двойников релейной защиты и автоматики»,
2 семестр

1. Методика оценки

Выполнение расчетно-графического задания (далее - РГЗ) является формой текущей аттестации (контроля) по дисциплине, предусмотренной учебным планом.

Цель РГЗ: студенты должны освоить и научиться программной реализации алгоритмов отвельных частей релейной защиты с последующим их анализом.

Обязательным элементом РГЗ являются постановка задачи, визуальная схема из документации существующего устройства РЗ, математическая реализация и анализ, включая, графики, подтверждающие корректность разработки цифрового двойника.

Вариант задания выдаётся преподавателем индивидуально.

РГЗ выполняется индивидуально.

Количество заданий достаточно для обеспечения, каждого обучающегося индивидуальным заданием РГЗ.

Замена задания РГЗ осуществляется по согласованию с преподавателем из числа резервных (не занятых) заданий.

Перед выполнением задания студент должен ознакомиться с принципами реализации предложенного алгоритма в типовом микропроцессорном устройстве.

Преподаватель осуществляет руководство по выполнению задания, оказывает консультационную помощь и принимает отчет по РГЗ.

По результатам выполнения РГЗ выполняется отчет, который состоит из следующих частей:

1. Титульный лист (см. ниже).
2. Теоретическая часть, представляющая собой четкий и развернутый ответ на вопрос, как данный алгоритм реализуется в настоящее время. По мере необходимости текстовый материал может дополняться графиками, рисунками и таблицами.
3. Практическая часть (программный код с пояснениями и графики характерных режимов).
4. Выводы.

Требования к оформлению:

Объем РГЗ до 20 страниц машинописного текста формата А4. Шрифт Times New Roman, 12. Размещение сканированных формул не допускается. Нумерация страниц сквозная, в нижней части листа по центру арабскими цифрами. Работа должна быть отредактирована, не содержать орфографических, синтаксических и стилевых ошибок.

Отчет в установленные сроки сдается на кафедру для проверки. Преподаватель оценивает качество работы, отмечает положительные стороны и недостатки работы и определяет, допускается ли она к защите. При необходимости преподаватель возвращает РГЗ студенту для доработки и устанавливает сроки повторного предоставления для

проверки. До защиты работы студентом должны быть сделаны необходимые исправления и дополнения по всем замечаниям преподавателя.

При положительном результате оценивания РГЗ студент её распечатывает (или загружает в соответствующий раздел дисциплины среды DiSpace), передает на кафедру и защищает до сессии в назначенное преподавателем время.

Защита РГЗ состоит в индивидуальном устном собеседовании студента с преподавателем. В процессе защиты выявляется уровень знаний студента, степень его самостоятельности при выполнении работы. По результатам защиты студенту выставляется оценка в соответствии с критериями, приведенными в п. 2 настоящего Паспорта.

2. Критерии оценки результатов обучения, соотнесенных с уровнями освоения индикаторов достижения компетенций

Общие правила выставления оценок текущей аттестации определяются балльно-рейтинговой системой, установленной локальным актом НГТУ.

РГЗ считается выполненной **на продвинутом** уровне, если все необходимые расчеты произведены самостоятельно и без ошибок; все разделы РГЗ выполнены правильно и в полном объеме; работа оформлена в соответствии с требованиями; сдана преподавателю в указанные сроки и не возвращалась для доработки; даны полные и развернутые выводы и рекомендации; на защите студентом даны уверенные и аргументированные ответы. Совокупность запланированных результатов и соотнесенных с ними индикаторов достижения компетенций не содержит пробелов. Закрепленные за РГЗ(Р) компетенции сформированы на продвинутом уровне. Оценка составляет *от 100 до 87 баллов.*

РГЗ считается выполненной **на базовом** уровне, если все необходимые расчеты произведены самостоятельно и без существенных ошибок; все разделы РГЗ выполнены правильно, но есть замечания к полноте предоставления информации; работа оформлена в соответствии с требованиями; сдана преподавателю в указанные сроки и однократно возвращалась студенту для незначительной доработки; в заключении даны выводы и рекомендации; на защите студентом допущены непринципиальные ошибки. Совокупность запланированных результатов и соотнесенных с ними индикаторов достижения компетенций содержит несущественные пробелы. Закрепленные за РГЗ компетенции сформированы на базовом уровне. Оценка составляет *от 86 до 73 баллов.*

РГЗ считается выполненной **на пороговом** уровне, если все необходимые расчеты произведены самостоятельно, но с ошибками, часть из которых носит принципиальный характер; есть замечания к полноте предоставления информации; работа оформлена в соответствии с требованиями; сдана преподавателю, но неоднократно возвращалась студенту для доработки; в заключении даны краткие выводы; защита РГЗ вызывает у студента серьезные затруднения. Совокупность запланированных результатов и соотнесенных с ними индикаторов достижения компетенций содержит существенные пробелы. Закрепленные за РГЗ компетенции сформированы на пороговом уровне. Оценка составляет *от 72 до 50 баллов.*

РГЗ считается **не выполненной** (ниже порогового уровня), если расчеты произведены с серьезными ошибками; есть замечания к полноте предоставления информации и оформлению; РГЗ была сдана преподавателю, но неоднократно возвращалась студенту для доработки, что не привело к улучшению ее качества; РГЗ не допущена до защиты, что свидетельствует о неудовлетворительном уровне достигнутых студентом результатов. Совокупность запланированных результатов и соотнесенных с ними индикаторов достижения компетенций содержит множественные существенные пробелы. Закрепленные за РГЗ компетенции не сформированы. Оценка составляет менее 50 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

РГЗ как форма текущей аттестации (контроля) по дисциплине считается успешно выполненной, если сумма полученных баллов по всем его заданиям составляет от 100 до 50 баллов включительно.

4. Примерный перечень тем РГЗ

1) Алгоритмы выделения аварийных составляющих (прямая последовательность).

2) Алгоритмы выделения аварийных составляющих (обратная последовательность).

3) Алгоритмы выделения аварийных составляющих (нулевая последовательность).

4) Алгоритмы пусковых органов (реле тока).

4) Алгоритмы пусковых органов (реле направления мощности).

5) Алгоритмы пусковых органов (реле сопротивления: круговая характеристика).

7) Алгоритмы пусковых органов (реле сопротивления: эллиптическая характеристика).

8) Алгоритмы пусковых органов (реле сопротивления: полигональная характеристика).

9) Алгоритмы пусковых органов (реле сопротивления: вырез от нагрузки).

10) Алгоритмы фиксации тяжести коротких замыканий.

11) Алгоритмы дифференциальной защиты трансформатора.

12) Алгоритмы реализации качественных признаков внешнего КЗ в дифференциальной защите.

13) Алгоритмы выделения аварийных составляющих (измерение частоты).

14) Алгоритмы выделения аварийных составляющих (измерение скорости изменения частоты).

15) Алгоритмы выделения аварийных составляющих (измерение угла между эквивалентными ЭДС).

5. Пример оформленного РГЗ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ЭлСт



РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

«МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЕ СНИЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ В MatLab»

Факультет: ФЭН
Группа:
Студент:
Преподаватель: Осинцев А.А.
Дата выполнения:
Отметка о защите:

Новосибирск, 202_

Моделирование реле частоты

Для контроля режима работы энергосистемы в программе реализован орган срабатывания по снижению частоты. Назначением реле частоты является обнаружение аварийного снижения частоты сети и формирование выходного сигнала после заданной выдержки времени. Подобные устройства применяются в схемах автоматической частотной разгрузки (АЧР), противоаварийной автоматики и делительной защиты энергосистем.

До возникновения аварийного режима частота сети принимается равной номинальному значению 50 Гц. После возникновения нарушения режима моделируется плавное снижение частоты энергосистемы. Используется экспоненциальный закон изменения частоты с затухающими электромеханическими колебаниями, что позволяет воспроизвести характерный переходный процесс реальной энергосистемы.

Поскольку частота изменяется во времени, угол электрической фазы определяется интегрированием мгновенной частоты. В дискретной форме расчёт выполняется рекуррентно, что обеспечивает непрерывность фазового угла и корректное формирование синусоид напряжений и токов аварийного режима.

Преобразования Кларка-Парка

Для работы реле частоты необходимо определить текущую частоту по измеренным фазным напряжениям. В программе используется алгоритм на основе пространственного вектора напряжения и преобразования Кларка.

Трёхфазная система напряжений преобразуется в неподвижную двухкоординатную систему α-β. После преобразования формируется комплексный пространственный вектор напряжения. Частота сети определяется по изменению угла пространственного вектора между соседними отсчётами.

Для уменьшения влияния дискретизации и переходных процессов применяется усреднение нескольких последних измерений частоты. Использование преобразования Кларка позволяет учитывать информацию сразу от трёх фаз и обеспечивает более устойчивое определение частоты по сравнению с методами, основанными на поиске моментов перехода напряжения через нуль.

Алгоритм работы реле частоты

Реле частоты реализовано в виде отдельной программной функции RCH. На вход функции поступают измеренная частота, действующие значения фазных напряжений, уставка срабатывания, величина гистерезиса и выдержка времени.

Срабатывание пускового органа происходит при снижении частоты ниже заданной уставки. Для предотвращения многократного переключения при колебаниях частоты используется гистерезис. После срабатывания пускового органа начинается отсчёт выдержки времени. Если частота остаётся ниже уставки в течение заданного времени, формируется выходной сигнал реле.

При восстановлении частоты выше частоты возврата производится возврат реле в исходное состояние и сброс таймера. Дополнительно реализована блокировка по напряжению, исключающая ложное определение частоты при глубоких провалах напряжения.

В результате реализован программный орган минимальной частоты, способный определять снижение частоты энергосистемы, контролировать выдержку времени и формировать выходной сигнал в соответствии с заданными уставками.

Листинг основной программы Main_RCH.m, реализующей работы реле частоты

```
clc; clear; close all;
```

```
%Параметры КЗ и доаварийного режима
Lkz = 70; %km
t0 = 0.1; %длительность доаварийного режима, с
t1 = 0.5; %длительность аварийного режима, с / ДЛЯ РЕЛЕ ЧАСТОТЫ
Fdiskr = 1200; %частота дискретизации
Tdisk = 1/Fdiskr; %шаг по времени между опросами
f0 = 50; %Гц, частота напряжения в доаварийном режиме
df = 5; %Гц, максимальное отклонение по частоте
ff = 10; %Гц, частота колебания частоты
FiI0 = 90/180*pi; %начальное значение угла тока в фазе А в
доаварийном режиме

%Параметры генератора
UnomG = 10.5; %kV
InomG = 8086; %A
PnomG = 125; %MW
xd11 = 0.195; %p.u.
cosFI = 0.85;
%Параметры трансформатора
UnomVN = 121; %kV
UnomNN = 10.5; %kV
SnomT = 160; %MVA
UkT = 10.5; %%
dPkzT = 550; % kW
%Параметры ЛЭП
ZudL = 0.078+1i*0.387; %Ohm/km
LenLine = 75; %km
%Параметры системы
Esys = 115; %kV
Zsys = 1i*3.019; %Ohm
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Расчет параметров схемы замещения
Zl1 = ZudL * Lkz;
Zl2 = ZudL * (LenLine - Lkz);
%-----------------------------------------
Abs_Zt = UkT/100*UnomVN^2/SnomT;
Rt = dPkzT/1000 * (UnomVN/SnomT)^2;
Xt = sqrt(Abs_Zt^2 - Rt^2);
Zt = Rt+1i*Xt;
Ktr = UnomVN / UnomNN;
%-----------------------------------------
SnomG = PnomG / cosFI;
XgNN = xd11 * UnomG^2 / SnomG;
XgVN = XgNN * Ktr^2;
FInom = acos(cosFI);
sinFI = sqrt(1-cosFI^2);
EgNN = sqrt((UnomG+sqrt(3)*InomG/1000*XgNN*sinFI)^2 + ...
            (sqrt(3)*InomG/1000*XgNN*cosFI)^2);
EgVN = EgNN * Ktr;

%Расчет комплексных токов КЗ и напряжений в фазе А
```

```
Ikz_Gen_A = EgVN*1000 / sqrt(3) / ...
    (1i*XgVN + Zt + Zl1);
[abs(Ikz_Gen_A), angle(Ikz_Gen_A)*180/pi];
Ikz_Sys_A = Esys*1000 / sqrt(3) / ...
    (Zsys + Zl2);
[abs(Ikz_Sys_A), angle(Ikz_Sys_A)*180/pi];
Uost_BusB_A = Ikz_Gen_A * Zl1;
[abs(Uost_BusB_A)/1000*sqrt(3), angle(Uost_BusB_A)*180/pi];

%Расчет комплексных токов КЗ и напряжений в фазе В и С
a_vr = exp(1i*120/180*pi);
a2_vr = exp(1i*240/180*pi);

%Расчет комплексных токов КЗ от генератора в фазе В и С
Ikz_Gen_B = Ikz_Gen_A * a2_vr;
Ikz_Gen_C = Ikz_Gen_A * a_vr;
[abs(Ikz_Gen_B), angle(Ikz_Gen_B)*180/pi];
[abs(Ikz_Gen_C), angle(Ikz_Gen_C)*180/pi];

%Расчет комплексных токов КЗ от системы в фазе В и С
Ikz_Sys_B = Ikz_Sys_A * a2_vr;
Ikz_Sys_C = Ikz_Sys_A * a_vr;

%Расчет комплексных значений ост.U в фазах В и С на ПС В
Uost_BusB_B = Uost_BusB_A * a2_vr;
Uost_BusB_C = Uost_BusB_A * a_vr;


%Расчет токов и напряжений в доаварийном режиме
t_doKZ = 0:Tdisk:t0;
Count0 = length(t_doKZ);

i0_Gen_A = zeros(1,Count0);i0_Gen_B = i0_Gen_A;i0_Gen_C =
i0_Gen_A;
u0_ost_BusB_A = zeros(1,Count0);
u0_ost_BusB_B = u0_ost_BusB_A;
u0_ost_BusB_C = u0_ost_BusB_A;

Freq0 = zeros(1,Count0);
for i=1:Count0
  % До нарушения режима принимаем номинальную частоту 50 Гц.
  Freq0(i) = f0;
  Angle = 2*pi*f0*t_doKZ(i);
  i0_Gen_A(i) = sqrt(2)*InomG/Ktr*sin(Angle+FiI0);
  i0_Gen_B(i) = sqrt(2)*InomG/Ktr*sin(Angle+FiI0-120/180*pi);
  i0_Gen_C(i) = sqrt(2)*InomG/Ktr*sin(Angle+FiI0+120/180*pi);

%-----------------------------------------------------------
---------
  u0_ost_BusB_A(i) =
sqrt(2/3)*UnomVN*1000*sin(Angle+FiI0+FInom);
  u0_ost_BusB_B(i) = sqrt(2/3)*UnomVN*1000*sin(Angle+FiI0+FInom-
120/180*pi);
```

```
  u0_ost_BusB_C(i) =
sqrt(2/3)*UnomVN*1000*sin(Angle+FiI0+FInom+120/180*pi);
end

%Расчет токов и напряжений в аварийном режиме
t_KZ = t0+Tdisk:Tdisk:t1+t0;
Count1 = length(t_KZ);
i1_Gen_A = zeros(1,Count1);i1_Gen_B = i1_Gen_A;i1_Gen_C =
i1_Gen_A;
i1a_Gen_A = zeros(1,Count1);i1a_Gen_B = i1a_Gen_A;i1a_Gen_C =
i1a_Gen_A;
u1_ost_BusB_A = zeros(1,Count1);
u1_ost_BusB_B = u1_ost_BusB_A;
u1_ost_BusB_C = u1_ost_BusB_A;
Freq1 = zeros(1,Count1);

%Определение угла между напряжением и током при КЗ
dFI = angle(Uost_BusB_A)-angle(Ikz_Gen_A);

%Определение постоянной времени сост. тока КЗ от генератора
Zkz_Gen = 1i*XgVN + Zt + Zl1;
Ta_Gen = imag(Zkz_Gen)/(2*pi*f0)/real(Zkz_Gen);

% Плавное снижение частоты после нарушения режима
Angle_old = 2*pi*f0*t0;

for i=1:Count1
  % После нарушения режима задаем электромеханическое колебание
частоты.
  % tau - время от момента возникновения нарушения режима.
  tau = t_KZ(i)-t0;
  % В момент t0 частота равна f0, затем сначала снижается.
  % df - максимальное отклонение частоты, ff - частота
колебаний.
  f_ust = 47;       % Гц, установившаяся частота после нарушения
  Tf = 0.15;        % с, постоянная времени снижения частоты
  Aosc = 0.2;       % Гц, амплитуда затухающих колебаний
  fosc = 2;         % Гц, частота электромеханических колебаний
  sigma = 4;        % 1/с, коэффициент затухания

  Freq1(i) = f_ust + (f0 - f_ust)*exp(-tau/Tf) + ...
             Aosc*exp(-sigma*tau)*sin(2*pi*fosc*tau);
  %Freq1(i) = f0-df*sin(2*pi*ff*tau);

  % Угол является интегралом мгновенной частоты:
  % Angle(t) = 2*pi*integral(f(t)dt).
  % Добавка (cos(...)-1) обеспечивает непрерывность угла в
момент t0.

  Angle_old = Angle_old + 2*pi*Freq1(i)*Tdisk;
  Angle = Angle_old;

  %Angle = 2*pi*f0*t_KZ(i)+(df/ff)*(cos(2*pi*ff*tau)-1);
```

```
  %формирование синусоиды по напряжениию
  u1_ost_BusB_A(i) =
sqrt(2)*abs(Uost_BusB_A)*sin(Angle+FiI0+FInom);
  u1_ost_BusB_B(i) =
sqrt(2)*abs(Uost_BusB_A)*sin(Angle+FiI0+FInom-120/180*pi);
  u1_ost_BusB_C(i) =
sqrt(2)*abs(Uost_BusB_A)*sin(Angle+FiI0+FInom+120/180*pi);
  %формирование синусоиды по току
  i1_Gen_A(i) = sqrt(2)*abs(Ikz_Gen_A)*sin(Angle+FiI0+FInom-
dFI);
  i1_Gen_B(i) = sqrt(2)*abs(Ikz_Gen_B)*sin(Angle+FiI0+FInom-dFI-
120/180*pi);
  i1_Gen_C(i) = sqrt(2)*abs(Ikz_Gen_C)*sin(Angle+FiI0+FInom-
dFI+120/180*pi);
  %формирование свободной составляющей тока КЗ
  i1a_Gen_A(i) = (i0_Gen_A(end)-i1_Gen_A(1))*exp(-(t_KZ(i)-t0-
Tdisk)/Ta_Gen);
  i1a_Gen_B(i) = (i0_Gen_B(end)-i1_Gen_B(1))*exp(-(t_KZ(i)-t0-
Tdisk)/Ta_Gen);
  i1a_Gen_C(i) = (i0_Gen_C(end)-i1_Gen_C(1))*exp(-(t_KZ(i)-t0-
Tdisk)/Ta_Gen);
end

%формирование результирующих осциллограмм тока и напряжения
Time = [t_doKZ,t_KZ];
Freq = [Freq0, Freq1];
u_ost_BusB_A = [u0_ost_BusB_A, u1_ost_BusB_A];
u_ost_BusB_B = [u0_ost_BusB_B, u1_ost_BusB_B];
u_ost_BusB_C = [u0_ost_BusB_C, u1_ost_BusB_C];
i_Gen_A = [i0_Gen_A, (i1_Gen_A+i1a_Gen_A)];
i_Gen_B = [i0_Gen_B, (i1_Gen_B+i1a_Gen_B)];
i_Gen_C = [i0_Gen_C, (i1_Gen_C+i1a_Gen_C)];

figure('Name','Первичные токи');
plot(Time,i_Gen_A,'k',Time,i_Gen_B,'g',Time,i_Gen_C,'r');

figure('Name','Первичные напряжения');
plot(Time,u_ost_BusB_A,'k',Time,u_ost_BusB_B,'g',Time,u_ost_BusB
_C,'r');

%формирование вторичных токов
W2 = 150; %число витков вторичной обмотки Ктт=750/5
Lsr = 1.95; %длина средней линии магнитопровода ТТ, м
Stt = 57.6*10^(-4); %площадь поперечного сечения магнитопровода
ТТ, м2
Xtt = 0.68; %индуктивное сопротивление ТТ, Ом
Rtt = 0.42; %активное сопротивление ТТ, Ом
Br = [0;1.4;-1]; %остаточная индукция в ТТ, Тл
Rn = [1.6; 1.6; 1.6]; %активное сопротивление нагрузки ТТ, Ом
Xn = [0; 0; 0]; %индуктивное сопротивление нагрузки ТТ, Ом
Ro = 1.6; %активное сопротивление нагрузки в нул. проводе ТТ, Ом
Xo = 0; %индуктивное сопротивление нагрузки в нул. проводе ТТ,
Ом
```

```
I1 = [i_Gen_A;i_Gen_B;i_Gen_C];
I2 =
CTGroupCalc(Time,I1,Tdisk,2*pi*f0,Rn,Xn,Ro,Xo,Br,Rtt,Xtt,Stt,Lsr
,W2);

figure('Name','Вторичные токи ТТ');
plot(Time,i_Gen_A/W2,'k--',Time,i_Gen_B/W2,'g--',Time,i_Gen_C/
W2,'r--',...
     Time,I2(1,:),'k',Time,I2(2,:),'g',Time,I2(3,:),'r');grid;

%расчет вторичных напряжений
Ku = 110000/100;
U2 = [u_ost_BusB_A/Ku; u_ost_BusB_B/Ku;u_ost_BusB_C/Ku];


% РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕЛЕ ЧАСТОТЫ
% Частота вычисляется согласно преобразованиям Кларка-Парка

Navg_RCH = 3; % число отсчетов для короткого скользящего
усреднения
Freq_RCH = FreqRCH_AlphaBeta(U2,Fdiskr,f0,Navg_RCH);

% Контрольный график: заданная частота и частота, измеренная
органом
figure('Name','Частота энергосистемы и вход реле частоты');
hold on; grid on; box on;
plot(Time,Freq,'r','LineWidth',2);
plot(Time,Freq_RCH,'k','LineWidth',1.2);
plot([t0 t0],[min(Freq)-1 max(Freq)+1],'k--','LineWidth',1);
xlabel('Время, с');
ylabel('Частота, Гц');
title('Моделируемая и измеренная частота');
legend('Моделируемая частота','Частота на входе РЧ','t_0');
xlim([Time(1) Time(end)]);
ylim([min(Freq)-1 max(Freq)+1]);

%Расчет действующих значений фазных вторичных токов
I2_RMS = [RMS_v2(I2(1,:),Fdiskr);...
          RMS_v2(I2(2,:),Fdiskr);...
          RMS_v2(I2(3,:),Fdiskr)];
%Расчет действующих значений фазных вторичных напряжений
U2_RMS = [Av(RMS_v2(U2(1,:),Fdiskr),Fdiskr);...
          Av(RMS_v2(U2(2,:),Fdiskr),Fdiskr);...
          Av(RMS_v2(U2(3,:),Fdiskr),Fdiskr)];
U2_RMS2 = [RMS_dIn(U2(1,:),Freq, Fdiskr, 400);...
          RMS_dIn(U2(2,:),Freq, Fdiskr, 400);...
          RMS_dIn(U2(3,:),Freq, Fdiskr, 400)];

%-------------------------------------------------------------
% Реле частоты по снижению частоты с выдержкой времени
% Параметры реле частоты по снижению частоты
```

```
Fsr_RCH = 49;        % Гц, частота срабатывания
dF_RCH = 0.1;        % Гц, гистерезис частотного органа
Kv_RCH = 0.98;
T_v_RCH = 0.12;       % с, выдержка времени
Umin_RCH = 10;       % В, блокировка при малом напряжении

[Out_RCH, Out_KF_RCH, Timer_RCH, Fvozv_RCH] = ...
    RCH(Freq_RCH, U2_RMS, Time, t0, ...
        Fsr_RCH, dF_RCH, T_v_RCH, Tdisk, Umin_RCH);
```

Листинг программы, реализующей расчет частоты для реле FreqRCH_AlphaBeta

```
function Freq = FreqRCH_AlphaBeta(U, Fdiskr, f0, Navg)
% FreqRCH_AlphaBeta - расчет частоты по трехфазным напряжениям.
%
% Метод:
% 1. Преобразование Кларка: Ua, Ub, Uc -> Ualpha, Ubeta.
% 2. Формирование комплексного пространственного вектора
Ualpha+j*Ubeta.
% 3. Расчет приращения его угла между соседними отсчетами.
% 4. Короткое причинное скользящее усреднение.
%
% U       - матрица 3xN фазных напряжений;
% Fdiskr  - частота дискретизации, Гц;
% f0      - начальная частота, Гц;
% Navg    - число отсчетов усреднения (1 - без усреднения).

  if nargin < 4
      Navg = 1;
  end

  dt = 1/Fdiskr;
  Count = size(U,2);
  FreqRaw = f0*ones(1,Count);
  Freq = f0*ones(1,Count);

  % Преобразование Кларка для симметричной трехфазной системы.
  Ualpha = sqrt(2/3)*(U(1,:)-0.5*U(2,:)-0.5*U(3,:));
  Ubeta  = (U(2,:)-U(3,:))/sqrt(2);
  Uvec = Ualpha+1i*Ubeta;

  for i=2:Count
      % Угол произведения U(k)*conj(U(k-1)) равен приращению
фазы.
      dPhi = angle(Uvec(i)*conj(Uvec(i-1)));
      fNew = dPhi/(2*pi*dt);

      % Защита от недостоверного результата при исчезновении
напряжения.
      if isfinite(fNew) && fNew > 30 && fNew < 70 && ...
              abs(Uvec(i)) > 1e-6 && abs(Uvec(i-1)) > 1e-6
          FreqRaw(i) = fNew;
```

```
        else
            FreqRaw(i) = FreqRaw(i-1);
        end
    end

    % Причинное скользящее среднее: используются только текущий и
прошлые
    % отсчеты, поэтому алгоритм пригоден для релейного органа.
    for i=2:Count
        iBeg = max(2,i-Navg+1);
        Freq(i) = mean(FreqRaw(iBeg:i));
    end
end
```

Для наглядности наблюдения за накоплением выдержки времени реле длительность аварийного режима увеличена до 0,5 с, а закон изменения частоты – на более плавный вместо синусоидального, использованного в работе МТО.

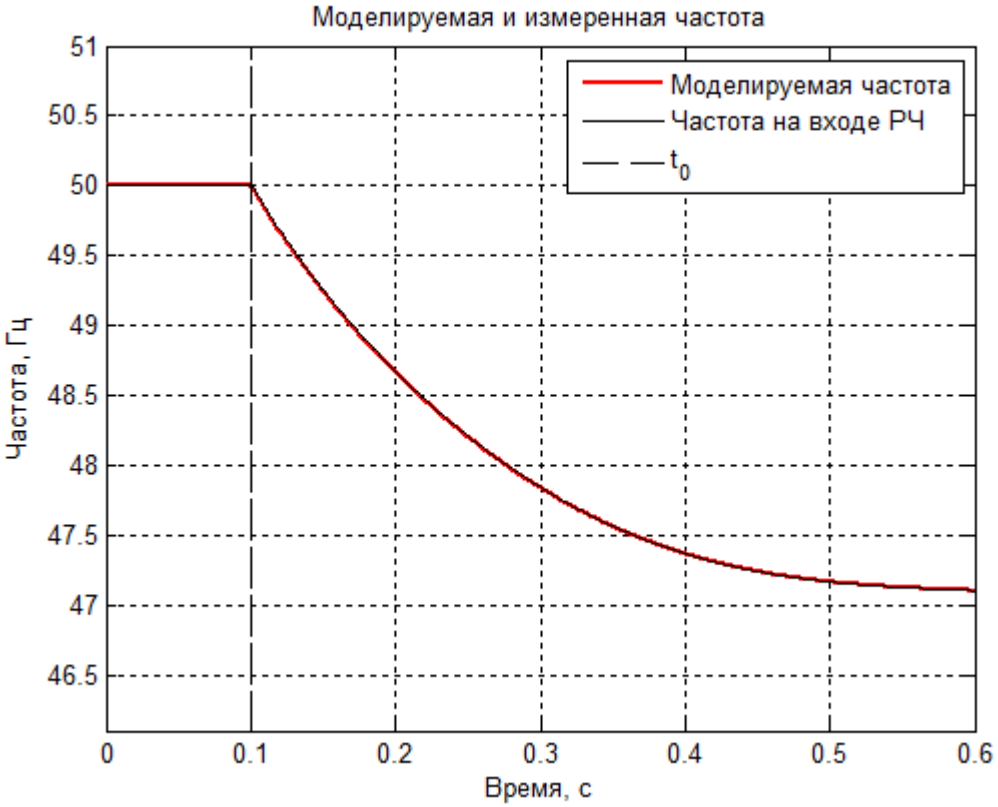


Рисунок 1 – Моделируемая и восстановленная частота

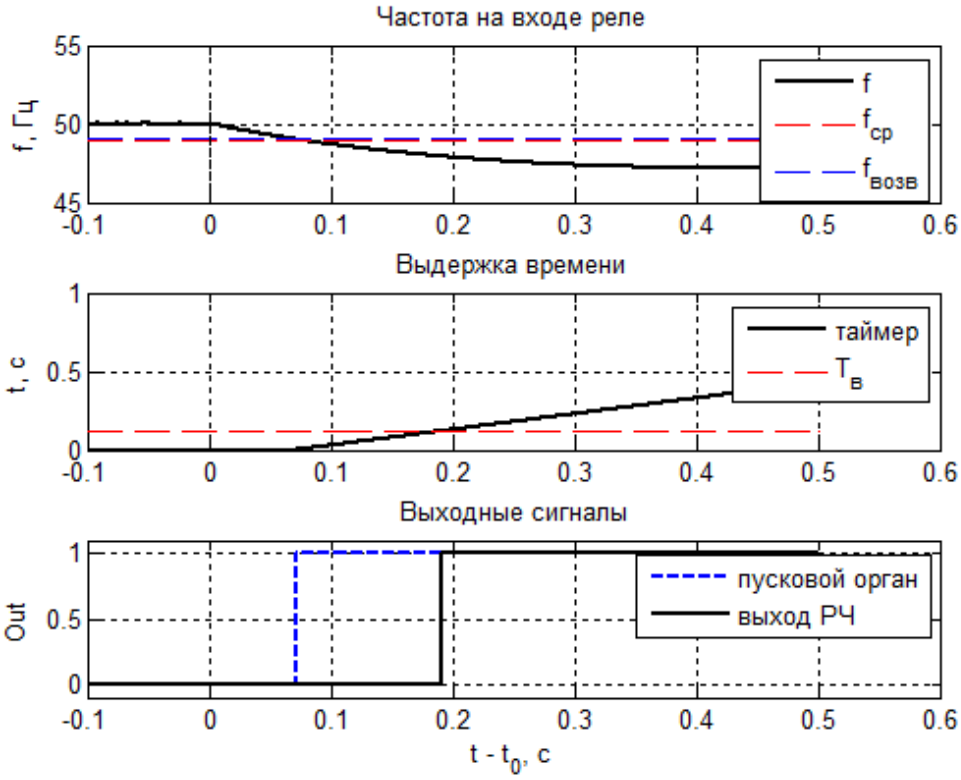


Рисунок 2 – Реле снижения частоты

При моделировании частоты в виде синусоидального сигнала приходится принимать длительность аварийного режима равной 0,1 и выдержку времени 0,2 с как для токового реле, так как с обычной минимальной выдержкой времени 0,12 с, выдержка времени не успевает накопиться из-за высокой скорости изменения частоты.

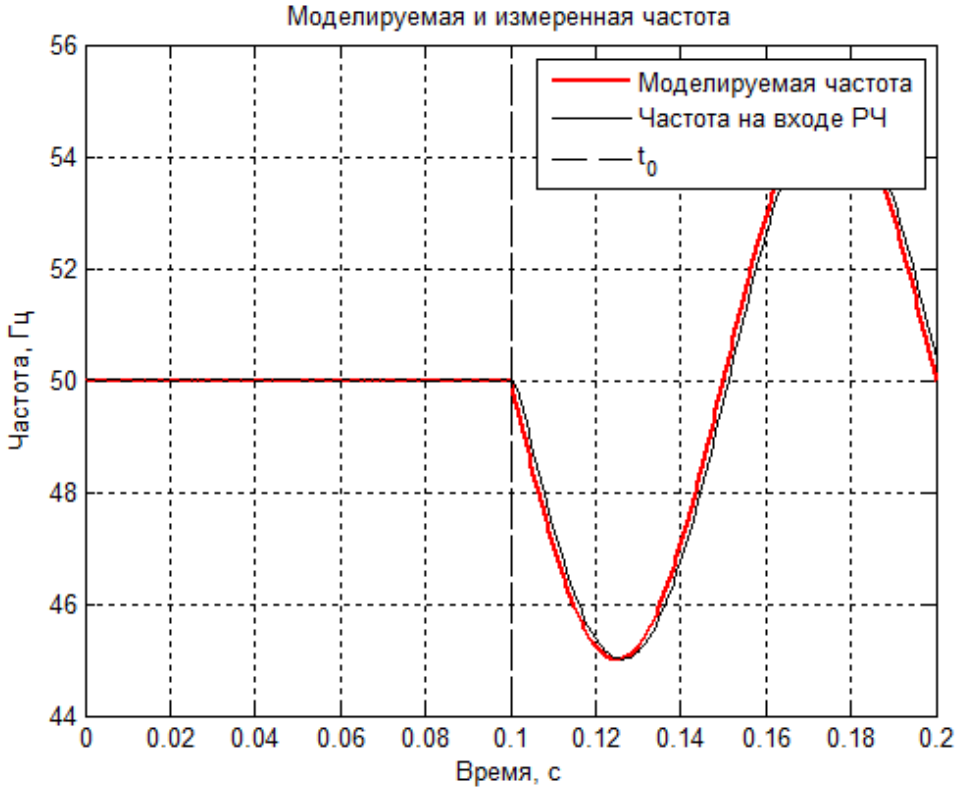


Рисунок 3 – Моделируемая частота в виде синусоиды

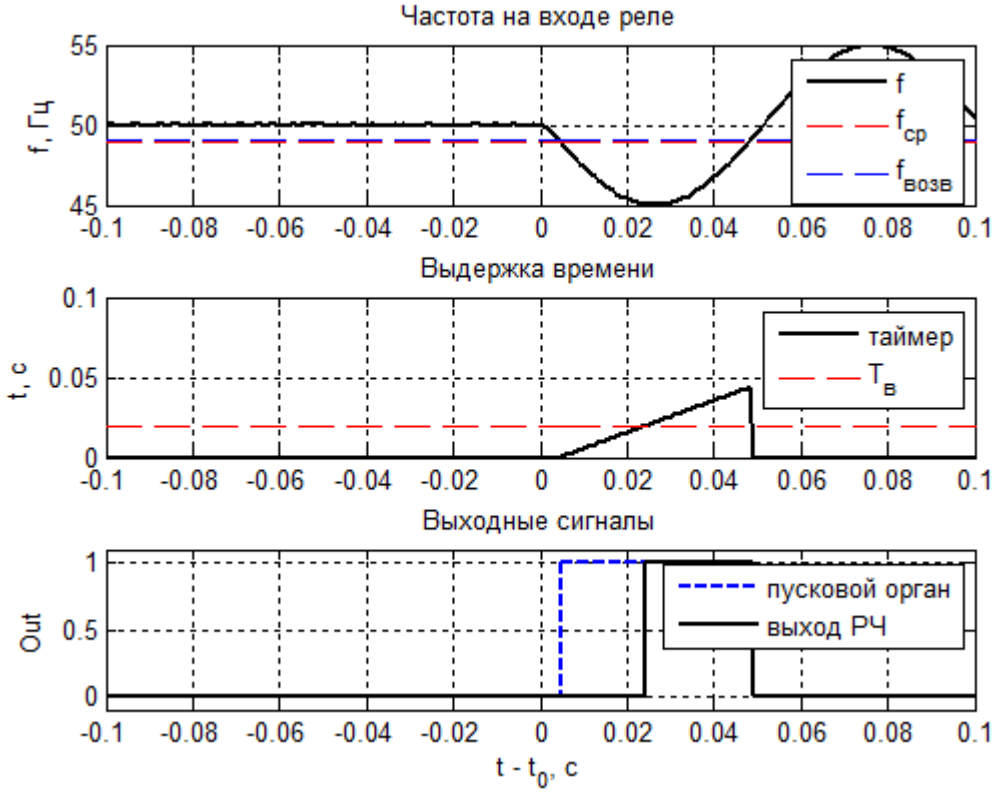


Рисунок 4 – Орган срабатывания реле частоты

Вывод: исходя из графика моделируемого реле частоты, при снижении частоты ниже уставки срабатывания $f_{ср}=49,0\,Гц$, происходит запуск реле спустя 0,7 секунд после начала аварийного режима. Спустя выдержку времени 0,12 с (принято как минимальная для реле РСГ-11), частота не восстанавливается до частоты возврата и происходит срабатывание реле. При моделировании синусоидального сигнала изменения частоты, но при выставлении выдержки времени 0,12 будет происходить попеременный запуск и возврат пускового органа, но реле срабатывать не будет, так как при такой скорости изменения выдержка времени не успеет накопиться.