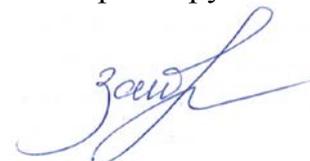


федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ 110–500 кВ**

Специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Том 2

ПРИЛОЖЕНИЯ

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Лебедев В.Д.

ИВАНОВО 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Приложение А.....	3
Приложение Б.....	6
Приложение В.....	8
Приложение Г.....	10
Приложение Д.....	15
Приложение Е.....	18
Приложение Ж.....	22
Приложение И.....	34
Приложение К.....	46
Приложение Л.....	49
Приложение М.....	55
Приложение Н.....	79
Приложение П.....	94
Приложение Р.....	99
Приложение С.....	100
Приложение Т.....	101
Приложение У.....	102

Приложение А
(обязательное)

Вычислительный сценарий для расчёта распределения температуры в сечении коаксиального экранированного кабеля и окружающем пространстве в программе

MATLAB

```
%% Исходные данные
gamma_Cu=5e7; % Электропроводность меди при t=80 C (См/м)
lymda_Cu=400; % Теплопроводность меди, Вт/(м К)
lymda_Pe=0.235; % Теплопроводность полиэтилена, Вт/(м*К)
lymda_Gr=1; % Теплопроводность грунта, Вт/(м К)
S_g_Cu=0.0012; % Площадь поперечного сечения жилы (по меди) (кв.м)
S_e_Cu=0.000185; % Площадь поперечного сечения экрана (по меди) (кв.м)
alfa=1; % Коэффициент при граничном условии третьего рода Вт/(кв.м*С)
r1=0.0428/2; % Радиус жилы
r2=0.0938/2; % Наружный радиус внутренней изоляции
r3=0.0978/2; % Наружный радиус экрана
r4=0.1118/2; % Наружный радиус внешней изоляции
r5=4/2; % Радиус внешней границы модели
Sg=pi*r1^2; % Площадь поперечного сечения жилы
Se=pi*(r3^2-r2^2); % Площадь поперечного сечения экрана
t0=10; % Температура окружающей среды
%% Расчёт эквивалентной проводимости жилы и экрана с учётом их заполнения
gamma_g_ekv=gamma_Cu*S_g_Cu/Sg; % Проводимость жилы
gamma_e_ekv=gamma_Cu*S_e_Cu/Se; % Проводимость экрана
%% Установка цикла для перебора значений параметра k
k=[0 0.2 0.4 0.6];
for n=1:length(k)
%% Расчёт плотностей токов
I_g=1240; % Ток жилы
I_e=I_g*k(n); % Ток экрана
delta_g=I_g/Sg; % эквивалентная плотность тока жилы
```

$\Delta_e = I_e / S_e$; % эквивалентная плотность тока экрана

%% Решение уравнения теплопроводности относительно граничных условий

$t_5 = t_0 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} + \Delta_e^2 \cdot S_e / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot r_5 \cdot \alpha)$;

% t_5 - температура на границе расчётной области

$t_4 = t_5 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} + \Delta_e^2 \cdot S_e / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Gr}) \cdot \log(r_5 / r_4)$;

% t_4 - температура на стыке поверхности кабеля и грунта

$t_3 = t_4 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} + \Delta_e^2 \cdot S_e / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Pe}) \cdot \log(r_4 / r_3)$;

% t_3 - температура на поверхности экрана

$t_2 = t_3 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} - \Delta_e^2 \cdot \pi \cdot r_2^2 / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Cu}) \cdot \log(r_3 / r_2) + \Delta_e^2 / (4 \cdot \gamma_{e_ekv} \cdot \lambda_{Cu}) \cdot (r_3^2 - r_2^2)$;

% t_2 - температура на стыке между внутренней изоляцией из сшит.полиэтилена и экрана

$t_1 = t_2 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Pe}) \cdot \log(r_2 / r_1)$;

%% Определение температуры на основе решения кусочно-заданных функций

$r_{11} = 0 : 0.0001 : r_1$;

$t_{11} = t_1 + \Delta_g^2 / (\gamma_{g_ekv} \cdot 4 \cdot \lambda_{Cu}) \cdot (r_1^2 - r_{11}^2)$;

$r_{22} = r_1 : 0.001 : r_2$;

$t_{22} = t_2 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Pe}) \cdot \log(r_2 / r_{22})$;

$r_{33} = r_2 : 0.0001 : r_3$;

$t_{33} = t_3 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} - \Delta_e^2 \cdot \pi \cdot r_2^2 / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Cu}) \cdot \log(r_3 / r_{33}) + \Delta_e^2 / (4 \cdot \gamma_{e_ekv} \cdot \lambda_{Cu}) \cdot (r_3^2 - r_{33}^2)$;

$r_{44} = r_3 : 0.0001 : r_4$;

$t_{44} = t_4 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} + \Delta_e^2 \cdot S_e / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Pe}) \cdot \log(r_4 / r_{44})$;

$r_{55} = r_4 : 0.001 : r_5$;

$t_{55} = t_5 + (\Delta_g^2 \cdot S_g / \gamma_{g_ekv} + \Delta_e^2 \cdot S_e / \gamma_{e_ekv}) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Gr}) \cdot \log(r_5 / r_{55})$;

$r = [r_{11} \ r_{22} \ r_{33} \ r_{44} \ r_{55}]$; $t = [t_{11} \ t_{22} \ t_{33} \ t_{44} \ t_{55}]$;

plot(r,t); % функции построения графика

hold on

end

Приложение Б

(обязательное)

Описание построения компьютерной модели в программе COMSOL Multiphysics
установившегося теплового поля на основе метода конечных элементов

Для создания модели теплового поля в программе COMSOL Multiphysics необходимо выбрать соответствующий тематический раздел: Heat Transfer Module/General Heat Transfer. В случае выбора стационарного решателя, в этом разделе решается дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, которое представлено в следующем виде:

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = q_v. \quad (\text{Б.1})$$

В поле построения геометрии создаём модель по параметрам из таблицы 2.3. Тепловые характеристики областей устанавливаем в соответствии с данными таблицы 2.4, а значения проводимостей жилы и экрана принимаем в соответствии со значениями, рассчитанными по формулам (2.41) и (2.42). В качестве граничных условий принимаем условия третьего рода с коэффициентом $a = \lambda_e = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Чтобы вычислить величину тепловыделения в токоведущих частях кабеля необходимо в окне Constants записать последовательность выражений, представленную в таблице Б.1:

Таблица Б.1. Данные в окне Constants

Название константы	Выражение	Описание
k	0	Коэффициент тока в экране
r1	0.0428/2	Радиус жилы
r2	0.0938/2	Наружный радиус изоляции
r3	0.0978/2	Наружный радиус экрана
Sg	$\pi \cdot r1^2$	Площадь поперечного сечения жилы
Se	$\pi \cdot (r3^2 - r2^2)$	Площадь поперечного сечения экрана
gamma_g_ekv	$\text{gamma}_{Cu} \cdot S_g_{Cu} / S_g$	Эквивалентная проводимость жилы
gamma_e_ekv	$\text{gamma}_{Cu} \cdot S_e_{Cu} / S_e$	Эквивалентная проводимость экрана
I_g	1240	Ток жилы
I_e	$I_g \cdot k$	Ток экрана
delta_g	I_g / S_g	Плотность тока в жиле

delta_e	I_e/Se	Плотность тока в экране
Qg	$\delta_g^2/\gamma_{g_ekv}$	Объёмная плотность тепловыделения в жиле
Qe	$\delta_e^2/\gamma_{e_ekv}$	Объёмная плотность тепловыделения в экране

Коэффициент k является переменным параметром, определяющим отношение тока в экране к току в жиле. В настройке параметров решателя выбираем параметрический расчёт и задаём значения параметра $k = [0; 0,2; 0,4; 0,6]$.

Приложение В
(обязательное)

Вычислительный сценарий для расчёта температуры жилы коаксиального экранированного кабеля при изменении внешней границы расчёта в программе
MATLAB

```
%% Расчёт теплового поля идеального кабеля
gamma_Cu=5e7; % Электропроводность меди при t=80 C (См/м)
lymda_Cu=400; % Теплопроводность меди, Вт/(м К)
lymda_Pe=0.235; % Теплопроводность полиэтилена, Вт/(м*К)
lymda_Gr=1; % Теплопроводность грунта, Вт/(м К)
S_g_Cu=0.0012; % Площадь поперечного сечения жилы (по меди) (кв.м)
S_e_Cu=0.000185; % Площадь поперечного сечения экрана (по меди) (кв.м)
alfa=1; % Коэффициент при граничном условии третьего рода Вт/(кв.м*С)
r1=0.0428/2; % Радиус жилы
r2=0.0938/2; % Наружный радиус внутренней изоляции
r3=0.0978/2; % Наружный радиус экрана
r4=0.1118/2; % Наружный радиус внешней изоляции
r5=0.2:0.1:20; % Радиус внешней границы модели
Sg=pi*r1^2; % Площадь поперечного сечения жилы
Se=pi*(r3^2-r2^2); % Площадь поперечного сечения экрана
%% Расчёт эквивалентной проводимости жилы и экрана с учётом их заполнения
gamma_g_ekv=gamma_Cu*S_g_Cu/Sg; % Проводимость жилы
gamma_e_ekv=gamma_Cu*S_e_Cu/Se; % Проводимость экрана
%% Режимные параметры
I_g=1240; % Ток жилы
I_e=I_g*0.6; % Ток экрана
t0=10; % Температура окружающей среды
delta_g=I_g/Sg; % эквивалентная плотность тока жилы
delta_e=I_e/Se; % эквивалентная плотность тока экрана
%% Обнуление температуры жилы
t11=0;
```

```

%% Установка цикла для перебора значений радиуса внешней границы модели
for n = 1:1:length(r5)
%% Решение системы уравнений относительно граничных условий
t5=t0+(delta_g^2*Sg/gamma_g_ekv+delta_e^2*Se/gamma_e_ekv)/(2*pi*r5(n)*alfa);
% t5 - температура на границе расчётной области
t4=t5+(delta_g^2*Sg/gamma_g_ekv+delta_e^2*Se/gamma_e_ekv)/(2*pi*lymda_Gr)*log(r5(n)
)/r4);
% t4 - температура на стыке поверхности кабеля и грунта
t3=t4+(delta_g^2*Sg/gamma_g_ekv+delta_e^2*Se/gamma_e_ekv)/(2*pi*lymda_Pe)*log(r4/r
3);
% t3 - температура на поверхности экрана
t2=t3+(delta_g^2*Sg/gamma_g_ekv-
delta_e^2*pi*r2^2/gamma_e_ekv)/(2*pi*lymda_Cu)*log(r3/r2)...
+delta_e^2/(4*gamma_e_ekv*lymda_Cu)*(r3^2-r2^2);
% t2-температура на стыке между внутренней изоляцией из сшит.полиэтилена и экрана
t1=t2+(delta_g^2*Sg/gamma_g_ekv)/(2*pi*lymda_Pe)*log(r2/r1);
%% Определение температуры жилы
r11=0;
t11(n)=t1+delta_g^2/(gamma_g_ekv*4*lymda_Cu)*(r1^2-r11^2);
end
plot(r5,t11); % функции построения графика
hold on

```

Приложение Г

(обязательное)

Вычислительный сценарий для расчёта зависимости температуры в центре жилы от радиуса нижней границы для теплового поля одного кабеля

%% Вычислительный сценарий для расчёта зависимости температуры в центре жилы от радиуса нижней границы расчёта

n=0; % Индекс

R=0; % Радиус нижней границы расчёта

T1=0; % Температура в центре жилы

for r = 3:1:50 % Организация цикла по перебору значений R

n=n+1; % Присвоение следующего значения индекса по порядку

R(n)=r; % Запись текущего значения радиуса нижней границы в массив R

%% Далее идёт вычислительный сценарий полевого расчёта

flclear fem

% COMSOL version

clear vrsn

vrsn.name = 'COMSOL 3.5';

vrsn.ext = '';

vrsn.major = 0;

vrsn.build = 494;

vrsn.rcs = '\$Name: \$';

vrsn.date = '\$Date: 2008/09/19 16:09:48 \$';

fem.version = vrsn;

% Geometry

parr={point2(0,0)};

g1=geomcoerce('point',parr);

g2=circ2('0.0214','base','center','pos',{0,0},'rot',0);

g3=circ2('0.0469','base','center','pos',{0,0},'rot',0);

g4=circ2('0.0489','base','center','pos',{0,0},'rot',0);

g5=circ2('0.0559','base','center','pos',{0,0},'rot',0);

carr={curve2([-r,r],[1.5,1.5],[1,1]), ...

```

curve2([r,r,0],[1.5,-(r-1.5),-(r-1.5)],[1,0.7071067811865475,1]), ...
curve2([0,-r,-r],[-(r-1.5),-(r-1.5),1.5],[1,0.7071067811865475,1]);
g6=geomcoerce('solid',carr);
% Analyzed geometry
clear p s
p.objs={g1};
p.name={'PT1'};
p.tags={'g1'};
s.objs={g2,g3,g4,g5,g6};
s.name={'C1','C2','C3','C4','CO1'};
s.tags={'g2','g4','g6','g8','g9'};
fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);
% Constants
fem.const = {'k','0.6', ...
'gamma_Cu','5e7', ...
'lymda_Cu','400', ...
'lymda_Pe','0.235', ...
'lymda_Gr','1', ...
'S_g_Cu','0.0012', ...
'S_e_Cu','0.000185', ...
'r1','0.0428/2', ...
'r2','0.0938/2', ...
'r3','0.0978/2', ...
'Sg','pi*r1^2', ...
'Se','pi*(r3^2-r2^2)', ...
'gamma_g_ekv','gamma_Cu*S_g_Cu/Sg', ...
'gamma_e_ekv','gamma_Cu*S_e_Cu/Se', ...
'I_g','1240', ...
'I_e','I_g*k', ...
'T0','10', ...
'delta_g','I_g/Sg', ...

```

```

'delta_e','I_e/Se', ...
'Qg','delta_g^2*Sg/gamma_g_ekv', ...
'Qe','delta_e^2*Se/gamma_e_ekv'};
% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hauto',1);
% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'GeneralHeat';
appl.module = 'HT';
appl.shape = {'shlag(1,"J")','shlag(2,"T")'};
appl.assignsuffix = '_htgh';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q','q','cont'};
bnd.shape = 1;
bnd.T0 = {'273.15+T0',273.15,273.15};
bnd.Tinf = {'273.15+T0','273.15+T0',273.15};
bnd.h = {'alfa',0,0};
bnd.ind = [1,2,3,3,3,3,3,3,3,2,3,3,3,3,3,3,3];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sdtype = 'gls';
equ.rho = 0;
equ.shape = 2;
equ.C = 0;
equ.Q = {0,0,'Qe/Se','Qg/Sg'};
equ.k = {'lymda_Gr','lymda_Pe','lymda_Cu','lymda_Cu'};
equ.ind = [1,2,3,2,4];
appl.equ = equ;

```

```

fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;
% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Integration coupling variables
clear elem
elem.elem = 'elcplscalar';
elem.g = {'1'};
src = cell(1,1);
src{1} = {{},{},{}};
elem.src = src;
geomdim = cell(1,1);
geomdim{1} = {};
elem.geomdim = geomdim;
elem.var = {};
elem.global = {};
elem.maxvars = {};
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
% Global expressions
fem.globalexpr = {'qpx','((Qg+Qe)*x)/(2*pi*(x^2+y^2))', ...
'qmx','-((Qg+Qe)*x)/(2*pi*(x^2+(y-2*h1)^2))', ...
'qpy','((Qg+Qe)*y)/(2*pi*(x^2+y^2))', ...
'qmy','-((Qg+Qe)*(y-2*h1))/(2*pi*(x^2+(y-2*h1)^2))', ...
'qx','qpx+qmx', ...
'qy','qpy+qmy', ...
'q','sqrt(qx^2+qy^2)', ...

```

```

'qn','q*cos(acos((y-h1)/sqrt(x^2+(y-h1)^2))-acos(qy/q))', ...
'alfa','1.163*sqrt(2.1)*(6+3.1*(273.15+T0-T)/2.1^2)'};

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'solcomp',{'T'}, ...
    'outcomp',{'T'}, ...
    'blocksize','auto');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% Запись текущего значения температуры в центре жилы в массив T1
T1(n)=postint(fem,'T', ...
    'unit','degC', ...
    'recover','off', ...
    'dl',[11], ...
    'edim',0);

end

plot(R, T1); % Построение графика

```

Приложение Д
(обязательное)

Последовательности выражений для определения граничных условий в компьютерных моделях, созданных в программе COMSOL Multiphysics для случаев расположения фаз кабельной линии треугольником и в плоскости

Таблица Д.1. Выражения для проекции вектора теплового потока на нормаль к границе области расчёта при расположении фаз кабельной линии треугольником

Название переменной	Выражение	Описание
Qk	$Qg+Qe$	Тепловыделение одним кабелем
qax	$Qk*(x+D/2)/(2*pi*((x+D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы А на ось Oх
qay	$Qk*(y+h1)/(2*pi*((x+D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы А на ось Oу
qbx	$Qk*x/(2*pi*((x)^2+(y+h1-D*sqrt(3)/2)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы В на ось Oх
qby	$Qk*(y+h1-D*sqrt(3)/2)/(2*pi*((x)^2+(y+h1-D*sqrt(3)/2)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы В на ось Oу
qcx	$Qk*(x-D/2)/(2*pi*((x-D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы С на ось Oх
qcy	$Qk*(y+h1)/(2*pi*((x-D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы С на ось Oу
qiax	$-Qk*(x+D/2)/(2*pi*((x+D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы А на ось Oх
qiaу	$-Qk*(y-h1)/(2*pi*((x+D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы А на ось Oу
qibx	$-Qk*x/(2*pi*((x)^2+(y-h1+D*sqrt(3)/2)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы В на ось Oх
qiby	$-Qk*(y-h1+D*sqrt(3)/2)/(2*pi*((x)^2+(y-h1+D*sqrt(3)/2)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы В на ось Oу
qicx	$-Qk*(x-D/2)/(2*pi*((x-D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы С на ось Oх
qicy	$-Qk*(y-h1)/(2*pi*((x-D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы С на ось Oу
q0x	$qax+qbx+qcx+qiax+qibx+qicx$	Проекция результирующего вектора

		теплового потока на ось Ox
q_{0y}	$q_{ay}+q_{by}+q_{cy}+q_{iay}+q_{iby}+q_{icy}$	Проекция результирующего вектора теплового потока на ось Oy
q_0	$\sqrt{q_{0x}^2+q_{0y}^2}$	Модуль результирующего вектора теплового потока
q_{0n}	$q_0*\cos(\arccos(y/\sqrt{x^2+y^2})-\arccos(q_{0y}/q_0))$	Проекция результирующего вектора теплового потока на нормаль к границе расчёта

Таблица Д.2. Выражения для проекции вектора теплового потока на нормаль к границе области расчёта при расположении фаз кабельной линии в плоскости

Название переменной	Выражение	Описание
Q_k	Q_g+Q_e	Тепловыделение одним кабелем
q_{ax}	$Q_k*(x+D/2)/(2*\pi*((x+D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы А на ось Ox
q_{ay}	$Q_k*(y+h1)/(2*\pi*((x+D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы А на ось Oy
q_{bx}	$Q_k*x/(2*\pi*((x)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы В на ось Ox
q_{by}	$Q_k*(y+h1)/(2*\pi*((x)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы В на ось Oy
q_{cx}	$Q_k*(x-D/2)/(2*\pi*((x-D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы С на ось Ox
q_{cy}	$Q_k*(y+h1)/(2*\pi*((x-D/2)^2+(y+h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от фазы С на ось Oy
$q_{i ax}$	$-Q_k*(x+D/2)/(2*\pi*((x+D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы А на ось Ox
$q_{i ay}$	$-Q_k*(y-h1)/(2*\pi*((x+D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы А на ось Oy
$q_{i bx}$	$-Q_k*x/(2*\pi*((x)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы В на ось Ox
$q_{i by}$	$-Q_k*(y-h)/(2*\pi*((x)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы В на ось Oy
$q_{i cx}$	$-Q_k*(x-D/2)/(2*\pi*((x-D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы С на ось Ox
$q_{i cy}$	$-Q_k*(y-h1)/(2*\pi*((x-D/2)^2+(y-h1)^2))$	Проекция вектора теплового потока от изображения фазы С на ось Oy

q_{0x}	$qax+qbx+qcx+qiax+qibx+qicx$	Проекция результирующего вектора теплового потока на ось Ox
q_{0y}	$qay+qby+qcy+qiax+qiby+qicy$	Проекция результирующего вектора теплового потока на ось Oy
q_0	$\sqrt{q_{0x}^2+q_{0y}^2}$	Модуль результирующего вектора теплового потока
q_{0n}	$q_0 \cdot \cos(\arccos(y/\sqrt{x^2+y^2}) - \arccos(q_{0y}/q_0))$	Проекция результирующего вектора теплового потока на нормаль к границе расчёта

Приложение Е

(обязательное)

Описание построения мультифизической модели теплового и электромагнитного полей в сечении КЛ с учётом схемы соединения токопроводящих элементов конструкции кабелей в программе COMSOL Multiphysics

Чтобы выполнить расчёт цепи, содержащей массивные токопроводящие элементы кабелей, в программе COMSOL Multiphysics необходимо:

1) в меню Options выбрать Integration Coupling Variables → Subdomain Variables, затем в списке Subdomain selection для соответствующих областей ввести переменные в соответствии с таблицей Е.1, в этом случае программа будет вычислять соответствующие токи в элементах конструкции кабелей по формуле Е.1;

Таблица Е.1. Интегральные переменные

Название переменной	Выражение	Описание
IgA	Jz_emqa	Ток в жиле фазы «А»
IgB	Jz_emqa	Ток в жиле фазы «В»
IgC	Jz_emqa	Ток в жиле фазы «С»
IeA	Jz_emqa	Ток в экране фазы «А»
IeB	Jz_emqa	Ток в экране фазы «В»
IeC	Jz_emqa	Ток в экране фазы «С»

$$I_i = \int_{S_i} \delta_z^i dS, \quad (\text{E.1})$$

где I_i – ток в i -м проводнике, А; δ_z^i – z-компонента плотности тока в i -м проводнике, А/м²; S_i – площадь поперечного сечения i -го проводника, м²;

2) в меню Options выбрать Expression → Global Expression и ввести переменные продольных напряжений на проводниках с начальным значением 1 В в соответствии с таблицей Е.2;

Таблица Е.2. Переменные продольных напряжений

Название переменной	Выражение	Описание
UgA	1	Напряжение на жиле фазы «А»
UgB	1	Напряжение на жиле фазы «В»
UgC	1	Напряжение на жиле фазы «С»

UeA	1	Напряжение на экране фазы «А»
UeB	1	Напряжение на экране фазы «В»
UeC	1	Напряжение на экране фазы «С»

3) в меню Physics выбрать пункт SPICE Circuit Edditor, поставить галочку около надписи «Force AC analysis» и ввести следующий текст:

```
IsorceA 0 1 1
```

```
IsorceB 0 2 1
```

```
IsorceC 0 3 1
```

```
XCoreA 1 0 CoreA
```

```
.SUBCKT CoreA IgA UgA COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreB 2 0 CoreB
```

```
.SUBCKT CoreB IgB UgB COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreC 3 0 CoreC
```

```
.SUBCKT CoreC IgC UgC COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XShealdA 0 0 ShealdA
```

```
.SUBCKT ShealdA IeA UeA COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XShealdB 0 0 ShealdB
```

```
.SUBCKT ShealdB IeB UeB COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XShealdC 0 0 ShealdC
```

```
.SUBCKT ShealdC IeC UeC COMSOL: *
```

```
.ENDS,
```

где терминалы присоединения элементов цепи соответствуют номерам потенциалов в схеме на рис. 2.30;

4) в меню Options выбрать Constants и изменить значения переменных: freq_cir на 50 (Гц), sim_ISOURCEA_ARG на $1055\sqrt{2}$ (A), sim_ISOURCEB_ARG на $1055\sqrt{2}e^{-j120^\circ}$ (A), sim_ISOURCEC_ARG на $1055\sqrt{2}e^{j120^\circ}$ (A).

После проделанных операций в окне Global Expression автоматически появятся выражения, которые являются системой линейных уравнений для токов и напряжений в цепи, изображённой на рисунке 2.30. Эти выражения приведены в таблице Е.3.

Таблица Е.3. Система линейных уравнений для рассчитываемой электрической цепи

Название переменной	Выражение	Описание
UgA	sim_XCOREA_v	Напряжение на жиле фазы «А»
UgB	sim_XCOREB_v	Напряжение на жиле фазы «В»
UgC	sim_XCOREC_v	Напряжение на жиле фазы «С»
UeA	sim_XSHEALDA_v	Напряжение на экране фазы «А»
UeB	sim_XSHEALDB_v	Напряжение на экране фазы «В»
UeC	sim_XSHEALDC_v	Напряжение на экнне фазы «С»
sim_XCOREC_p_v	sim_XCOREC_v+sim_XCOREC_n_v	XCOREC.p.v
sim_XCOREC_p_i	sim_ISOURCEC_i	XCOREC.p.i
sim_XCOREC_n_v	sim_GROUND_p_v	XCOREC.n.v
sim_XCOREC_n_i	-sim_XCOREC_p_i	XCOREC.n.i
sim_XCOREC_i	sim_XCOREC_p_i	XCOREC.i
sim_XSHEALDC_p_v	sim_XCOREC_n_v	XSHEALDC.p.v
sim_XSHEALDC_p_i	-sim_XSHEALDC_n_i	XSHEALDC.p.i
sim_XSHEALDC_n_v	sim_XCOREC_n_v	XSHEALDC.n.v
sim_XSHEALDC_n_i	-IeC	XSHEALDC.n.i
sim_XSHEALDC_i	sim_XSHEALDC_p_i	XSHEALDC.i
sim_XSHEALDB_p_v	sim_XCOREC_n_v	XSHEALDB.p.v
sim_XSHEALDB_p_i	-sim_XSHEALDB_n_i	XSHEALDB.p.i
sim_XSHEALDB_n_v	sim_XCOREC_n_v	XSHEALDB.n.v
sim_XSHEALDB_n_i	-IeB	XSHEALDB.n.i
sim_XSHEALDB_i	sim_XSHEALDB_p_i	XSHEALDB.i
sim_XCOREB_p_v	sim_XCOREB_v+sim_XCOREB_n_v	XCOREB.p.v
sim_XCOREB_p_i	sim_ISOURCEB_i	XCOREB.p.i
sim_XCOREB_n_v	sim_XCOREC_n_v	XCOREB.n.v
sim_XCOREB_n_i	-sim_XCOREB_p_i	XCOREB.n.i
sim_XCOREB_i	sim_XCOREB_p_i	XCOREB.i
sim_XSHEALDA_p_v	sim_XCOREC_n_v	XSHEALDA.p.v
sim_XSHEALDA_p_i	-sim_XSHEALDA_n_i	XSHEALDA.p.i
sim_XSHEALDA_n_v	sim_XCOREC_n_v	XSHEALDA.n.v
sim_XSHEALDA_n_i	-IeA	XSHEALDA.n.i
sim_XSHEALDA_i	sim_XSHEALDA_p_i	XSHEALDA.i

sim_XCOREA_p_v	sim_XCOREA_v+sim_XCOREC_n_v	XCOREA.p.v
sim_XCOREA_p_i	sim_ISOURCEA_i	XCOREA.p.i
sim_XCOREA_n_v	-sim_XCOREA_v+sim_XCOREA_p_v	XCOREA.n.v
sim_XCOREA_n_i	-sim_XCOREA_p_i	XCOREA.n.i
sim_XCOREA_i	sim_XCOREA_p_i	XCOREA.i
sim_ISOURCEB_i	sim_ISOURCEB_ARG	ISOURCEB.i
sim_ISOURCEB_p_v	sim_XCOREC_n_v	ISOURCEB.p.v
sim_ISOURCEB_p_i	sim_XCOREB_p_i	ISOURCEB.p.i
sim_ISOURCEB_n_v	sim_XCOREB_p_v	ISOURCEB.n.v
sim_ISOURCEB_n_i	-sim_ISOURCEB_p_i	ISOURCEB.n.i
sim_ISOURCEB_v	sim_ISOURCEB_p_v- sim_ISOURCEB_n_v	ISOURCEB.v
sim_ISOURCEC_i	sim_ISOURCEC_ARG	ISOURCEC.i
sim_ISOURCEC_p_v	sim_XCOREC_n_v	ISOURCEC.p.v
sim_ISOURCEC_p_i	sim_XCOREC_p_i	ISOURCEC.p.i
sim_ISOURCEC_n_v	sim_XCOREC_p_v	ISOURCEC.n.v
sim_ISOURCEC_n_i	-sim_ISOURCEC_p_i	ISOURCEC.n.i
sim_ISOURCEC_v	sim_ISOURCEC_p_v- sim_ISOURCEC_n_v	ISOURCEC.v
sim_ISOURCEA_i	sim_ISOURCEA_ARG	ISOURCEA.i
sim_ISOURCEA_p_v	sim_XCOREC_n_v	ISOURCEA.p.v
sim_ISOURCEA_p_i	sim_XCOREA_p_i	ISOURCEA.p.i
sim_ISOURCEA_n_v	sim_XCOREA_p_v	ISOURCEA.n.v
sim_ISOURCEA_n_i	-sim_ISOURCEA_p_i	ISOURCEA.n.i
sim_ISOURCEA_v	sim_ISOURCEA_p_v- sim_ISOURCEA_n_v	ISOURCEA.v
sim_GROUND_p_i	-sim_XCOREB_n_i- sim_XSHEALDC_p_i- sim_XSHEALDC_n_i- sim_ISOURCEA_p_i- sim_XSHEALDA_n_i- sim_XSHEALDA_p_i- sim_XCOREC_n_i-sim_ISOURCEB_p_i- sim_XCOREA_n_i- sim_XSHEALDB_n_i- sim_XSHEALDB_p_i- sim_ISOURCEC_p_i	GROUND.p.i

Приложение Ж
(обязательное)

Вычислительный алгоритм для расчёта зависимости максимальной температуры в сечении кабельной линии от радиуса нижней границы расчётной области при укладке кабелей треугольником

%% Вычислительный сценарий для расчёта зависимости максимальной температуры в сечении кабельной линии от радиуса нижней границы области расчёта

n=0; % Индекс

R=0; % Радиус нижней границы расчёта

T1=0; % Температура в центре жилы

r=[2 2.4 2.6 2.8 3 4 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 9 9.5 10 12 14 20 25 30 40 50 60]; % Массив значений радиуса нижней границы

m=length(r); % Определение конечного значение индекса n

for n = 1:1:m % Организация цикла по перебору значений R

R(n)=r(n); % Запись текущего значения радиуса нижней границы в массив R

%% Вычислительный сценарий полевого расчёта

fclose fem

% COMSOL version

clear vrsn

vrsn.name = 'COMSOL 3.5';

vrsn.ext = '';

vrsn.major = 0;

vrsn.build = 494;

vrsn.rcs = '\$Name: \$';

vrsn.date = '\$Date: 2008/09/19 16:09:48 \$';

fem.version = vrsn;

% Geometry

g1=circ2('0.0214','base','center','pos',{'-0.0559','0'},'rot','0');

g2=circ2('0.0469','base','center','pos',{'-0.0559','0'},'rot','0');

g3=circ2('0.0489','base','center','pos',{'-0.0559','0'},'rot','0');

g4=circ2('0.0559','base','center','pos',{'-0.0559','0'},'rot','0');

```

g5=circ2('0.0214','base','center','pos',{ '0','0.09682164'},'rot','0');
g6=circ2('0.0469','base','center','pos',{ '0','0.09682164'},'rot','0');
g7=circ2('0.0489','base','center','pos',{ '0','0.09682164'},'rot','0');
g8=circ2('0.0559','base','center','pos',{ '0','0.09682164'},'rot','0');
g9=circ2('0.0214','base','center','pos',{ '0.0559','0'},'rot','0');
g10=circ2('0.0469','base','center','pos',{ '0.0559','0'},'rot','0');
g11=circ2('0.0489','base','center','pos',{ '0.0559','0'},'rot','0');
g12=circ2('0.0559','base','center','pos',{ '0.0559','0'},'rot','0');
carr={curve2([-r(n),r(n)],[1.5,1.5],[1,1]), ...
      curve2([r(n),r(n),0],[1.5,-(r(n)-1.5),-(r(n)-1.5)],[1,0.7071067811865475,1]), ...
      curve2([0,-r(n),-r(n)],[-(r(n)-1.5),-(r(n)-1.5),1.5],[1,0.7071067811865475,1])});
g13=geomcoerce('solid',carr);
parr={point2(0,0)};
% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7,g8,g9,g10,g11,g12,g13};
s.name={'C1','C2','C3','C4','C5','C6','C7','C8','C9','C10','C11', ...
       'C12','CO1'};
s.tags={'g1','g2','g3','g4','g5','g6','g7','g8','g9','g10', ...
       'g11','g12','g13'};
fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);
% Constants
fem.const = {'gamma_Cu','58100000', ...
            'gamma_Gr','0.01', ...
            'Ik','1000', ...
            'f','50', ...
            'Lambda_Cu','400', ...
            'Lambda_Pe','0.235', ...
            'Lambda_Gr','1', ...
            'Ro_Cu','8960', ...
            'Ro_Pe','930', ...

```

```

'Ro_Gr','1000', ...
'cCu','384.18', ...
'cPe','2350', ...
'cGr','4200', ...
'alfa_Cu','0.0039', ...
'D','0.1118', ...
'h1','1.5', ...
'v','4', ...
'T0','10', ...
'S_g_Cu','0.0012', ...
'S_e_Cu','0.000095', ...
'r1','0.0428/2', ...
'r2','0.0938/2', ...
'r3','0.0978/2', ...
'Sg','pi*r1^2', ...
'Se','pi*(r3^2-r2^2)', ...
'gamma_g_ekv','gamma_Cu*S_g_Cu/Sg', ...
'gamma_e_ekv','gamma_Cu*S_e_Cu/Se', ...
'Ja','1055*sqrt(2)', ...
'Jb','1055*sqrt(2)*exp(-i*120*pi/180)', ...
'Jc','1055*sqrt(2)*exp(i*120*pi/180)', ...
'qe_cir','1.602E-19[C]', ...
'kB_cir','1.38E-23[J/K]', ...
'freq_cir','f[Hz]', ...
'T_cir','27.2[K]+273.15[K]', ...
'omega_cir','2*pi*freq_cir', ...
'sim_ISOURCEB_ARG','Jb', ...
'sim_ISOURCEC_ARG','Jc', ...
'sim_ISOURCEA_ARG','Ja', ...
'sim_GROUND_p_v','0'};

p=5;
if R(n)>10

```



```

equ.Q = 'Qav_emqa+Qmav_emqa';
equ.name = {'default',''};
equ.k = {'Lambda_Gr','Lambda_Pe','Lambda_Cu'};
equ.ind = [1,2,3,2,3,2,3,2,1,3,2,3,2,3];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'PerpendicularCurrents';
appl.module = 'ACDC';
appl.assigsuffix = '_emqa';
clear prop
prop.analysis='harmonic';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2','lm3'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'A0','cont'};
bnd.ind = [1,1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,2, ...
2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.L = 'lk';
equ.sigma = {'gamma_Gr',0,'gamma_e_ekv/(1+alfa_Cu*(T-
283.15))','gamma_g_ekv/(1+alfa_Cu*(T-283.15))', ...
'gamma_e_ekv/(1+alfa_Cu*(T-283.15))','gamma_Gr','gamma_g_ekv/(1+alfa_Cu*(T-
283.15))', ...
'gamma_e_ekv/(1+alfa_Cu*(T-283.15))','gamma_g_ekv/(1+alfa_Cu*(T-283.15))'};
equ.epsilonr = 0;
equ.deltaV = {'Ugr',0,'UeA','UgA','UeB',0,'UgB','UeC','UgC'};

```



```

    {}, 'ref'}, {{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, 'ref'}, {{}, {}, 'ref', {}, {}, {}, {}, {}, {}, {{}}, ...
    {}, 'ref', {}, {}, {}, {}, {}, {}, {{}, {}, {}, {}, 'ref', {}, {}, {}, {{}, {}, {}, {}, 'ref', ...
    {}, {}, {}, {{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, 'ref', {{}}, {{}, {}, {}, {}, {}, {}, 'ref', {{}}, { ...
    'ref', {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {{}}};
equ.ind = {'1'}, {'2', '4', '6', '8', '9', '11', '13'}, {'3'}, {'5'}, {'7'}, {'10'}, ...
    {'12'}, {'14'};
src{1} = {{}, {}, equ};
elem.src = src;
geomdim = cell(1,1);
geomdim{1} = {};
elem.geomdim = geomdim;
elem.var = {'IgA', 'qgA', 'IgB', 'qgB', 'IgC', 'qgC', 'IeA', 'qeA', 'IeB', 'qeB', ...
    'IeC', 'qeC', 'Igr'};
elem.global = {'1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', '13'};
elem.maxvars = {};
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;

% Global expressions
fem.globalexpr = {'UgA', 'sim_XCOREA_v', ...
    'UgB', 'sim_XCOREB_v', ...
    'UgC', 'sim_XCOREC_v', ...
    'UeA', 'sim_XSHEALDA_v', ...
    'UeB', 'sim_XSHEALDB_v', ...
    'UeC', 'sim_XSHEALDC_v', ...
    'Ugr', 'sim_XGROUND1_v', ...
    'ac', '(x+D/2)/((x+D/2)^2+(y)^2)', ...
    'as', '(y)/((x+D/2)^2+(y)^2)', ...
    'bc', '(x)/((x)^2+(y-D*sqrt(3)/2)^2)', ...
    'bs', '(y-D*sqrt(3)/2)/((x)^2+(y-D*sqrt(3)/2)^2)', ...
    'cc', '(x-D/2)/((x-D/2)^2+(y)^2)', ...
    'cs', '(y)/((x-D/2)^2+(y)^2)', ...

```

'a1c','(x+D/2)/((x+D/2)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'a1s','(y-2*h1)/((x+D/2)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'b1c','(x)/((x)^2+(y+D*sqrt(3)/2-2*h1)^2)', ...
 'b1s','(y+D*sqrt(3)/2-2*h1)/((x)^2+(y+D*sqrt(3)/2-2*h1)^2)', ...
 'c1c','(x-D/2)/((x-D/2)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'c1s','(y-2*h1)/((x-D/2)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'qx','((qgA+qeA)*ac+(qgB+qeB)*bc+(qgC+qeC)*cc-(qgA+qeA)*a1c-(qgB+qeB)*b1c-
 (qgC+qeC)*c1c)/(2*pi)', ...
 'qy','((qgA+qeA)*as+(qgB+qeB)*bs+(qgC+qeC)*cs-(qgA+qeA)*a1s-(qgB+qeB)*b1s-
 (qgC+qeC)*c1s)/(2*pi)', ...
 'q0','sqrt(qx^2+qy^2)', ...
 'q','q0*cos(acos(qy/(q0+0.000001))-acos((y-h1)/sqrt(x^2+(y-h1)^2)))', ...
 'alfaT','1.163*sqrt(v)*(6+3.1*(273.15+T0-T)/v^2)', ...
 'sim_XCOREC_p_v','sim_XCOREC_v+sim_XCOREC_n_v', ...
 'sim_XCOREC_p_i','sim_ISOURCEC_i', ...
 'sim_XCOREC_n_i','-sim_XCOREC_p_i', ...
 'sim_XCOREC_i','sim_XCOREC_p_i', ...
 'sim_XSHEALDC_p_v','sim_GROUND_p_v', ...
 'sim_XSHEALDC_p_i','-sim_XSHEALDC_n_i', ...
 'sim_XSHEALDC_n_v','-sim_XSHEALDC_v+sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_XSHEALDC_n_i','-IeC', ...
 'sim_XSHEALDC_i','sim_XSHEALDC_p_i', ...
 'sim_XGROUND1_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_XGROUND1_p_i','-sim_XGROUND1_n_i', ...
 'sim_XGROUND1_n_v','-sim_XGROUND1_v+sim_XGROUND1_p_v', ...
 'sim_XGROUND1_n_i','-Igr', ...
 'sim_XGROUND1_i','sim_XGROUND1_p_i', ...
 'sim_XSHEALDB_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_XSHEALDB_p_i','-sim_XSHEALDB_n_i', ...
 'sim_XSHEALDB_n_v','-sim_XSHEALDB_v+sim_XSHEALDB_p_v', ...
 'sim_XSHEALDB_n_i','-IeB', ...
 'sim_XSHEALDB_i','sim_XSHEALDB_p_i', ...

'sim_XCOREB_p_v','sim_XCOREB_v+sim_XCOREC_n_v', ...
'sim_XCOREB_p_i','sim_ISOURCEB_i', ...
'sim_XCOREB_n_v','-sim_XCOREB_v+sim_XCOREB_p_v', ...
'sim_XCOREB_n_i','-sim_XCOREB_p_i', ...
'sim_XCOREB_i','sim_XCOREB_p_i', ...
'sim_XSHEALDA_p_v','sim_XSHEALDA_v+sim_XCOREC_n_v', ...
'sim_XSHEALDA_p_i','-sim_XSHEALDA_n_i', ...
'sim_XSHEALDA_n_v','-sim_XSHEALDA_v+sim_XSHEALDA_p_v', ...
'sim_XSHEALDA_n_i','-IeA', ...
'sim_XSHEALDA_i','sim_XSHEALDA_p_i', ...
'sim_XCOREA_p_v','sim_XCOREA_v+sim_XCOREC_n_v', ...
'sim_XCOREA_p_i','sim_ISOURCEA_i', ...
'sim_XCOREA_n_v','-sim_XCOREA_v+sim_XCOREA_p_v', ...
'sim_XCOREA_n_i','-sim_XCOREA_p_i', ...
'sim_XCOREA_i','sim_XCOREA_p_i', ...
'sim_ISOURCEB_i','sim_ISOURCEB_ARG', ...
'sim_ISOURCEB_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
'sim_ISOURCEB_p_i','sim_XCOREB_p_i', ...
'sim_ISOURCEB_n_v','sim_XCOREB_p_v', ...
'sim_ISOURCEB_n_i','-sim_ISOURCEB_p_i', ...
'sim_ISOURCEB_v','sim_ISOURCEB_p_v-sim_ISOURCEB_n_v', ...
'sim_ISOURCEC_i','sim_ISOURCEC_ARG', ...
'sim_ISOURCEC_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
'sim_ISOURCEC_p_i','sim_XCOREC_p_i', ...
'sim_ISOURCEC_n_v','sim_XCOREC_p_v', ...
'sim_ISOURCEC_n_i','-sim_ISOURCEC_p_i', ...
'sim_ISOURCEC_v','sim_ISOURCEC_p_v-sim_ISOURCEC_n_v', ...
'sim_ISOURCEA_i','sim_ISOURCEA_ARG', ...
'sim_ISOURCEA_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
'sim_ISOURCEA_p_i','sim_XCOREA_p_i', ...
'sim_ISOURCEA_n_v','sim_XCOREA_p_v', ...
'sim_ISOURCEA_n_i','-sim_ISOURCEA_p_i', ...

```
'sim_ISOURCEA_v','sim_ISOURCEA_p_v-sim_ISOURCEA_n_v', ...
'sim_GROUND_p_i','-sim_XGROUND1_p_i-sim_ISOURCEA_p_i-
sim_XSHEALDA_p_i-sim_ISOURCEC_p_i-sim_ISOURCEB_p_i-sim_XSHEALDB_p_i-
sim_XSHEALDC_p_i'};
```

```
% Descriptions
```

```
clear descr
```

```
descr.const=
```

```
{'sim_GROUND_p_v','GROUND.p.v','sim_ISOURCEA_ARG','ISOURCEA.ARG','sim_ISO
URCEB_ARG','ISOURCEB.ARG','sim_ISOURCEC_ARG','ISOURCEC.ARG'};
```

```
descr.globalexpr=
```

```
{'sim_XSHEALDA_n_v','XSHEALDA.n.v','sim_ISOURCEB_p_i','ISOURCEB.p.i','sim_XC
OREB_p_i','XCOREB.p.i','sim_ISOURCEB_n_i','ISOURCEB.n.i','sim_XSHEALDA_p_v','X
SHEALDA.p.v','sim_ISOURCEB_p_v','ISOURCEB.p.v','sim_XGROUND1_p_v','XGROUN
D1.p.v','sim_XSHEALDA_n_i','XSHEALDA.n.i','sim_XCOREB_n_i','XCOREB.n.i','sim_XS
HEALDA_p_i','XSHEALDA.p.i','sim_ISOURCEA_n_i','ISOURCEA.n.i','sim_XGROUND1_
n_v','XGROUND1.n.v','sim_XCOREB_p_v','XCOREB.p.v','sim_ISOURCEC_p_i','ISOURCE
C.p.i','sim_ISOURCEC_p_v','ISOURCEC.p.v','sim_XCOREB_n_v','XCOREB.n.v','sim_ISO
URCEA_p_i','ISOURCEA.p.i','sim_ISOURCEA_n_v','ISOURCEA.n.v','sim_XSHEALDB_n_
v','XSHEALDB.n.v','sim_XSHEALDB_n_i','XSHEALDB.n.i','sim_ISOURCEA_p_v','ISOUR
CEA.p.v','sim_ISOURCEB_v','ISOURCEB.v','sim_ISOURCEC_i','ISOURCEC.i','sim_XGRO
UND1_i','XGROUND1.i','sim_ISOURCEB_n_v','ISOURCEB.n.v','sim_ISOURCEC_n_v','IS
OURCEC.n.v','sim_ISOURCEC_n_i','ISOURCEC.n.i','sim_GROUND_p_i','GROUND.p.i','si
m_ISOURCEC_v','ISOURCEC.v','sim_ISOURCEB_i','ISOURCEB.i','sim_XSHEALDC_p_i',
'XSHEALDC.p.i','sim_XCOREB_i','XCOREB.i','sim_ISOURCEA_v','ISOURCEA.v','sim_XS
HEALDB_p_i','XSHEALDB.p.i','sim_XCOREA_i','XCOREA.i','sim_XSHEALDC_n_v','XS
HEALDC.n.v','sim_XCOREC_i','XCOREC.i','sim_XSHEALDC_p_v','XSHEALDC.p.v','sim_
ISOURCEA_i','ISOURCEA.i','sim_XSHEALDB_p_v','XSHEALDB.p.v','sim_XSHEALDC_n_
_i','XSHEALDC.n.i','sim_XGROUND1_n_i','XGROUND1.n.i','sim_XCOREA_p_i','XCORE
A.p.i','sim_XSHEALDB_i','XSHEALDB.i','sim_XCOREA_n_v','XCOREA.n.v','sim_XCORE
C_p_i','XCOREC.p.i','sim_XSHEALDA_i','XSHEALDA.i','sim_XCOREC_n_i','XCOREC.n.i',
'sim_XCOREA_p_v','XCOREA.p.v','sim_XSHEALDC_i','XSHEALDC.i','sim_XCOREA_n_
```

```

i','XCOREA.n.i','sim_XCOREC_p_v','XCOREC.p.v','sim_XGROUND1_p_i','XGROUND1.p.
i'});
    descr.ode= {'sim_XGROUND1_v','XGROUND1.v 0','sim_XCOREC_n_v','XCOREC.n.v
0','sim_XCOREA_v','XCOREA.v 0','sim_XSHEALDC_v','XSHEALDC.v
0','sim_XCOREB_v','XCOREB.v 0','sim_XSHEALDB_v','XSHEALDB.v
0','sim_XCOREC_v','XCOREC.v 0','sim_XSHEALDA_v','XSHEALDA.v 0'};
    fem.descr = descr;
    % ODE Settings
    clear ode
ode.dim={'sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREC_v','sim_XSHEALDC_v','sim_XGROUND1_v
','sim_XSHEALDB_v','sim_XCOREB_v','sim_XSHEALDA_v','sim_XCOREA_v'};
    ode.f={'-sim_XSHEALDC_v+sim_XSHEALDC_p_v-
sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREC_p_i-IgC','-IeC-Igr-IeB-
IeA+sim_XCOREC_n_i+sim_XCOREA_n_i+sim_XCOREB_n_i','-
sim_XGROUND1_v+sim_XGROUND1_p_v-sim_XCOREC_n_v','-
sim_XSHEALDB_v+sim_XSHEALDB_p_v-sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREB_p_i-
IgB','sim_XSHEALDA_v+sim_XCOREC_n_v-sim_XSHEALDC_p_v','sim_XCOREA_p_i-
IgA'};
    ode.init={'0','0','0','0','0','0','0','0'};
    ode.dinit={'0','0','0','0','0','0','0','0'};
    clear units;
    units.basesystem = 'SI';
    ode.units = units;
    fem.ode=ode;
    % Multiphysics
    fem=multiphysics(fem);
    % Extend mesh
    fem.xmesh=meshextend(fem);
    % Solve problem
    fem.sol=femstatic(fem, ...

```

```

'solcomp',{'sim_XGROUND1_v','T','sim_XCOREA_v','sim_XCOREC_n_v','sim_XSHEALD
C_v','sim_XCOREB_v','sim_XSHEALDB_v','sim_XCOREC_v','sim_XSHEALDA_v','Az'},
...
'outcomp',{'sim_XGROUND1_v','T','sim_XCOREA_v','sim_XCOREC_n_v','sim_XSHEALD
C_v','sim_XCOREB_v','sim_XSHEALDB_v','sim_XCOREC_v','sim_XSHEALDA_v','Az'},
...
        'blocksize','auto');
% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;
% Plot solution
postplot(fem, ...
        'contdata',{'T','cont','internal','unit','degC'}, ...
        'contlevels',40, ...
        'contlabel','off', ...
        'contmap','jet(1024)', ...
        'contfill','on', ...
        'title','Contour: Temperature [degC]', ...
        'axis',[-3.406833701067766,3.406833701067766,-
1.788532423208191,1.7885324232081914]);
% Запись текущего значения температуры в центре жилы в массив T1
T1(n)=postint(fem,'T', ...
        'unit','degC', ...
        'recover','off', ...
        'dl',[17], ...
        'edim',0);
end
figure
plot(R, T1); % Построение графика

```

Приложение И
(обязательное)

Вычислительный алгоритм для расчёта зависимости температуры жилы средней фазы от радиуса нижней границы расчётной области расчёта при укладке кабелей в плоскости

%% Вычислительный сценарий для расчёта зависимости максимальной температуры в сечении кабельной линии от радиуса нижней границы области расчёта

n=0; % Индекс

R=0; % Радиус нижней границы расчёта

T1=0; % Температура в центре жилы

r=[2 2.4 2.6 2.8 3 4 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 9 9.5 10 12 14 20 25 30 40 50 60]; % Массив значений радиуса нижней границы

m=length(r); % Определение конечного значение индекса n

for n = 1:1:m % Организация цикла по перебору значений R

 R(n)=r(n); % Запись текущего значения радиуса нижней границы в массив R

 %% Далее идёт вычислительный сценарий полевого расчёта

 fclear fem

 % COMSOL version

 clear vrsn

 vrsn.name = 'COMSOL 3.5';

 vrsn.ext = '';

 vrsn.major = 0;

 vrsn.build = 494;

 vrsn.rcs = '\$Name: \$';

 vrsn.date = '\$Date: 2008/09/19 16:09:48 \$';

 fem.version = vrsn;

 % Geometry

 g1=circ2('0.0214','base','center','pos',{'-0.1118','0'},'rot','0');

 g2=circ2('0.0469','base','center','pos',{'-0.1118','0'},'rot','0');

 g3=circ2('0.0489','base','center','pos',{'-0.1118','0'},'rot','0');

 g4=circ2('0.0559','base','center','pos',{'-0.1118','0'},'rot','0');

 g5=circ2('0.0214','base','center','pos',{'0','0'},'rot','0');

```

g6=circ2('0.0469','base','center','pos',{ '0','0'},'rot','0');
g7=circ2('0.0489','base','center','pos',{ '0','0'},'rot','0');
g8=circ2('0.0559','base','center','pos',{ '0','0'},'rot','0');
g9=circ2('0.0214','base','center','pos',{ '0.1118','0'},'rot','0');
g10=circ2('0.0469','base','center','pos',{ '0.1118','0'},'rot','0');
g11=circ2('0.0489','base','center','pos',{ '0.1118','0'},'rot','0');
g12=circ2('0.0559','base','center','pos',{ '0.1118','0'},'rot','0');
carr={curve2([-r(n),r(n)],[1.5,1.5],[1,1]), ...
      curve2([r(n),r(n),0],[1.5,-(r(n)-1.5),-(r(n)-1.5)],[1,0.7071067811865475,1]), ...
      curve2([0,-r(n),-r(n)],[-(r(n)-1.5),-(r(n)-1.5),1.5],[1,0.7071067811865475,1])});
g13=geomcoerce('solid',carr);
% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7,g8,g9,g10,g11,g12,g13};
s.name={'C1','C2','C3','C4','C5','C6','C7','C8','C9','C10','C11', ...
       'C12','CO1'};
s.tags={'g1','g2','g3','g4','g5','g6','g7','g8','g9','g10', ...
       'g11','g12','g13'};
fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);
% Constants
fem.const = {'gamma_Cu','58100000', ...
            'gamma_Gr','0.01', ...
            'lk','1000', ...
            'f','50', ...
            'Lambda_Cu','400', ...
            'Lambda_Pe','0.235', ...
            'Lambda_Gr','1', ...
            'Ro_Cu','8960', ...
            'Ro_Pe','930', ...
            'Ro_Gr','1000', ...
            'cCu','384.18', ...

```

```

'cPe','2350', ...
'cGr','4200', ...
'alfa_Cu','0.0039', ...
'D','0.1118', ...
'h1','1.5', ...
'v','4', ...
'T0','10', ...
'S_g_Cu','0.0012', ...
'S_e_Cu','0.000095', ...
'r1','0.0428/2', ...
'r2','0.0938/2', ...
'r3','0.0978/2', ...
'Sg','pi*r1^2', ...
'Se','pi*(r3^2-r2^2)', ...
'gamma_g_ekv','gamma_Cu*S_g_Cu/Sg', ...
'gamma_e_ekv','gamma_Cu*S_e_Cu/Se', ...
'Ja','1055*sqrt(2)', ...
'Jb','1055*sqrt(2)*exp(-i*120*pi/180)', ...
'Jc','1055*sqrt(2)*exp(i*120*pi/180)', ...
'qe_cir','1.602E-19[C]', ...
'kB_cir','1.38E-23[J/K]', ...
'freq_cir','f[Hz]', ...
'T_cir','27.2[K]+273.15[K]', ...
'omega_cir','2*pi*freq_cir', ...
'sim_ISOURCEB_ARG','Jb', ...
'sim_ISOURCEC_ARG','Jc', ...
'sim_ISOURCEA_ARG','Ja', ...
'sim_GROUND_p_v','0'};

p=5;
if R(n)>10
    p=3;
else if R(n)>20

```



```

fem.appl{2} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;
% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Integration coupling variables
clear elem
elem.elem = 'elcplscalar';
elem.g = {'1'};
src = cell(1,1);
clear equ
equ.expr = {{{}, {}, {}, 'Jz_emqa', {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, ...
'Qav_emqa+Qmav_emqa', {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, 'Jz_emqa', {}, {}}, {{{}, ...
 {}, {}, {}, 'Qav_emqa+Qmav_emqa', {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, 'Jz_emqa', ...
 {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, 'Qav_emqa+Qmav_emqa', {{{}, {}, 'Jz_emqa', {}, {}, {}, ...
 {}, {}}, {{{}, {}, 'Qav_emqa+Qmav_emqa', {}, {}, {}, {}, {}, {{{}, {}, {}, {}, ...
 'Jz_emqa', {}, {}, {}, {{{}, {}, {}, {}, 'Qav_emqa+Qmav_emqa', {}, {}, {{{}, {}, ...
 {}, {}, {}, 'Jz_emqa', {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, {}, 'Qav_emqa+Qmav_emqa', {}}, { ...
 'Jz_emqa', {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}}};
equ.ipoints = {{{}, {}, {}, '4', {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, '4', {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, ...
 {}, {}, {}, '4', {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, '4', {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, '4', ...
 {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, '4', {{{}, {}, '4', {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, '4', {}, {}, ...
 {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, '4', {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, '4', {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, ...
 {}, {}, {}, '4', {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, '4', {}}, {'4', {}, {}, {}, {}, {}, {}}};
equ.frame = {{{}, {}, {}, 'ref', {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, 'ref', {}, {}, {}, {}}, {{{}, ...
 {}, {}, {}, 'ref', {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, 'ref', {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, {}, { ...
 {}, 'ref'}, {{{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, 'ref'}, {{{}, {}, 'ref', {}, {}, {}, {}}, {{{}, ...
 {}, 'ref', {}, {}, {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, 'ref', {}, {}, {}}, {{{}, {}, {}, {}, 'ref', ...

```


'b1s','(y-2*h1)/((x)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'c1c','(x-D)/((x-D)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'c1s','(y-2*h1)/((x-D)^2+(y-2*h1)^2)', ...
 'qx','((qgA+qeA)*ac+(qgB+qeB)*bc+(qgC+qeC)*cc-(qgA+qeA)*a1c-(qgB+qeB)*b1c-(qgC+qeC)*c1c)/(2*pi)', ...
 'qy','((qgA+qeA)*as+(qgB+qeB)*bs+(qgC+qeC)*cs-(qgA+qeA)*a1s-(qgB+qeB)*b1s-(qgC+qeC)*c1s)/(2*pi)', ...
 'q0','sqrt(qx^2+qy^2)', ...
 'q','q0*cos(acos(qy/(q0+0.000001))-acos((y-h1)/sqrt(x^2+(y-h1)^2)))', ...
 'alfaT','1.163*sqrt(v)*(6+3.1*(273.15+T0-T)/v^2)', ...
 'sim_XCOREC_p_v','sim_XCOREC_v+sim_XCOREC_n_v', ...
 'sim_XCOREC_p_i','sim_ISOURCEC_i', ...
 'sim_XCOREC_n_i','-sim_XCOREC_p_i', ...
 'sim_XCOREC_i','sim_XCOREC_p_i', ...
 'sim_XSHEALDC_p_v','sim_GROUND_p_v', ...
 'sim_XSHEALDC_p_i','-sim_XSHEALDC_n_i', ...
 'sim_XSHEALDC_n_v','-sim_XSHEALDC_v+sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_XSHEALDC_n_i','-IeC', ...
 'sim_XSHEALDC_i','sim_XSHEALDC_p_i', ...
 'sim_XGROUND1_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_XGROUND1_p_i','-sim_XGROUND1_n_i', ...
 'sim_XGROUND1_n_v','-sim_XGROUND1_v+sim_XGROUND1_p_v', ...
 'sim_XGROUND1_n_i','-Igr', ...
 'sim_XGROUND1_i','sim_XGROUND1_p_i', ...
 'sim_XSHEALDB_p_v','sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_XSHEALDB_p_i','-sim_XSHEALDB_n_i', ...
 'sim_XSHEALDB_n_v','-sim_XSHEALDB_v+sim_XSHEALDB_p_v', ...
 'sim_XSHEALDB_n_i','-IeB', ...
 'sim_XSHEALDB_i','sim_XSHEALDB_p_i', ...
 'sim_XCOREB_p_v','sim_XCOREB_v+sim_XCOREC_n_v', ...
 'sim_XCOREB_p_i','sim_ISOURCEB_i', ...
 'sim_XCOREB_n_v','-sim_XCOREB_v+sim_XCOREB_p_v', ...

'sim_XCOREB_n_i', '-sim_XCOREB_p_i', ...
 'sim_XCOREB_i', 'sim_XCOREB_p_i', ...
 'sim_XSHEALDA_p_v', 'sim_XSHEALDA_v+sim_XCOREC_n_v', ...
 'sim_XSHEALDA_p_i', '-sim_XSHEALDA_n_i', ...
 'sim_XSHEALDA_n_v', '-sim_XSHEALDA_v+sim_XSHEALDA_p_v', ...
 'sim_XSHEALDA_n_i', '-IeA', ...
 'sim_XSHEALDA_i', 'sim_XSHEALDA_p_i', ...
 'sim_XCOREA_p_v', 'sim_XCOREA_v+sim_XCOREC_n_v', ...
 'sim_XCOREA_p_i', 'sim_ISOURCEA_i', ...
 'sim_XCOREA_n_v', '-sim_XCOREA_v+sim_XCOREA_p_v', ...
 'sim_XCOREA_n_i', '-sim_XCOREA_p_i', ...
 'sim_XCOREA_i', 'sim_XCOREA_p_i', ...
 'sim_ISOURCEB_i', 'sim_ISOURCEB_ARG', ...
 'sim_ISOURCEB_p_v', 'sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_ISOURCEB_p_i', 'sim_XCOREB_p_i', ...
 'sim_ISOURCEB_n_v', 'sim_XCOREB_p_v', ...
 'sim_ISOURCEB_n_i', '-sim_ISOURCEB_p_i', ...
 'sim_ISOURCEB_v', 'sim_ISOURCEB_p_v-sim_ISOURCEB_n_v', ...
 'sim_ISOURCEC_i', 'sim_ISOURCEC_ARG', ...
 'sim_ISOURCEC_p_v', 'sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_ISOURCEC_p_i', 'sim_XCOREC_p_i', ...
 'sim_ISOURCEC_n_v', 'sim_XCOREC_p_v', ...
 'sim_ISOURCEC_n_i', '-sim_ISOURCEC_p_i', ...
 'sim_ISOURCEC_v', 'sim_ISOURCEC_p_v-sim_ISOURCEC_n_v', ...
 'sim_ISOURCEA_i', 'sim_ISOURCEA_ARG', ...
 'sim_ISOURCEA_p_v', 'sim_XSHEALDC_p_v', ...
 'sim_ISOURCEA_p_i', 'sim_XCOREA_p_i', ...
 'sim_ISOURCEA_n_v', 'sim_XCOREA_p_v', ...
 'sim_ISOURCEA_n_i', '-sim_ISOURCEA_p_i', ...
 'sim_ISOURCEA_v', 'sim_ISOURCEA_p_v-sim_ISOURCEA_n_v', ...

```
'sim_GROUND_p_i','-sim_XGROUND1_p_i-sim_XSHEALDC_p_i-
sim_XSHEALDA_p_i-sim_XSHEALDB_p_i-sim_ISOURCEA_p_i-sim_ISOURCEB_p_i-
sim_ISOURCEC_p_i}';
```

```
% Descriptions
```

```
clear descr
```

```
descr.const=
```

```
{'sim_GROUND_p_v','GROUND.p.v','sim_ISOURCEA_ARG','ISOURCEA.ARG','sim_ISO
URCEC_ARG','ISOURCEC.ARG','sim_ISOURCEB_ARG','ISOURCEB.ARG'};
```

```
descr.globalexpr=
```

```
{'sim_XSHEALDA_n_v','XSHEALDA.n.v','sim_ISOURCEB_p_i','ISOURCEB.p.i','sim_XC
OREB_p_i','XCOREB.p.i','sim_ISOURCEB_n_i','ISOURCEB.n.i','sim_XSHEALDA_p_v','X
SHEALDA.p.v','sim_ISOURCEB_p_v','ISOURCEB.p.v','sim_XGROUND1_p_v','XGROUN
D1.p.v','sim_XSHEALDA_n_i','XSHEALDA.n.i','sim_XCOREB_n_i','XCOREB.n.i','sim_XS
HEALDA_p_i','XSHEALDA.p.i','sim_ISOURCEA_n_i','ISOURCEA.n.i','sim_XGROUND1_
n_v','XGROUND1.n.v','sim_ISOURCEC_p_i','ISOURCEC.p.i','sim_XCOREB_p_v','XCORE
B.p.v','sim_ISOURCEC_p_v','ISOURCEC.p.v','sim_XCOREB_n_v','XCOREB.n.v','sim_ISO
URCEA_n_v','ISOURCEA.n.v','sim_ISOURCEA_p_i','ISOURCEA.p.i','sim_XSHEALDB_n_
v','XSHEALDB.n.v','sim_XSHEALDB_n_i','XSHEALDB.n.i','sim_ISOURCEA_p_v','ISOUR
CEA.p.v','sim_ISOURCEC_i','ISOURCEC.i','sim_ISOURCEB_v','ISOURCEB.v','sim_XGRO
UND1_i','XGROUND1.i','sim_ISOURCEB_n_v','ISOURCEB.n.v','sim_ISOURCEC_n_v','IS
OURCEC.n.v','sim_ISOURCEC_n_i','ISOURCEC.n.i','sim_GROUND_p_i','GROUND.p.i','si
m_ISOURCEC_v','ISOURCEC.v','sim_ISOURCEB_i','ISOURCEB.i','sim_XSHEALDC_p_i',
'XSHEALDC.p.i','sim_XCOREB_i','XCOREB.i','sim_ISOURCEA_v','ISOURCEA.v','sim_XS
HEALDB_p_i','XSHEALDB.p.i','sim_XCOREA_i','XCOREA.i','sim_XSHEALDC_n_v','XS
HEALDC.n.v','sim_XCOREC_i','XCOREC.i','sim_XSHEALDC_p_v','XSHEALDC.p.v','sim_
ISOURCEA_i','ISOURCEA.i','sim_XSHEALDB_p_v','XSHEALDB.p.v','sim_XSHEALDC_n_
_i','XSHEALDC.n.i','sim_XGROUND1_n_i','XGROUND1.n.i','sim_XCOREA_p_i','XCORE
A.p.i','sim_XSHEALDB_i','XSHEALDB.i','sim_XCOREA_n_v','XCOREA.n.v','sim_XCORE
C_p_i','XCOREC.p.i','sim_XSHEALDA_i','XSHEALDA.i','sim_XCOREC_n_i','XCOREC.n.i',
'sim_XCOREA_p_v','XCOREA.p.v','sim_XCOREA_n_i','XCOREA.n.i','sim_XSHEALDC_i',
'XSHEALDC.i','sim_XGROUND1_p_i','XGROUND1.p.i','sim_XCOREC_p_v','XCOREC.p.
v'};
```

```

desc r.ode= {'sim_XGROUND1_v','XGROUND1.v 0','sim_XCOREA_v','XCOREA.v
0','sim_XCOREC_n_v','XCOREC.n.v 0','sim_XSHEALDC_v','XSHEALDC.v
0','sim_XCOREB_v','XCOREB.v 0','sim_XSHEALDB_v','XSHEALDB.v
0','sim_XCOREC_v','XCOREC.v 0','sim_XSHEALDA_v','XSHEALDA.v 0'};

fem.descr = descr;

% ODE Settings
clear ode
ode.dim={'sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREC_v','sim_XSHEALDC_v','sim_XGROUND1_v
','sim_XSHEALDB_v','sim_XCOREB_v','sim_XSHEALDA_v','sim_XCOREA_v'};
ode.f={'-sim_XSHEALDC_v+sim_XSHEALDC_p_v-
sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREC_p_i-IgC','-IeC-Igr-IeB-
IeA+sim_XCOREB_n_i+sim_XCOREA_n_i+sim_XCOREC_n_i','-
sim_XGROUND1_v+sim_XGROUND1_p_v-sim_XCOREC_n_v','-
sim_XSHEALDB_v+sim_XSHEALDB_p_v-sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREB_p_i-
IgB','sim_XSHEALDA_v+sim_XCOREC_n_v-sim_XSHEALDC_p_v','sim_XCOREA_p_i-
IgA'};
ode.init={'0','0','0','0','0','0','0','0'};
ode.dinit={'0','0','0','0','0','0','0','0'};
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
'solcomp',{'sim_XGROUND1_v','T','sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREA_v','sim_XSHEALD
C_v','sim_XCOREB_v','sim_XSHEALDB_v','sim_XCOREC_v','sim_XSHEALDA_v','Az'},
...

```

```

'outcomp',{sim_XGROUND1_v','T','sim_XCOREC_n_v','sim_XCOREA_v','sim_XSHEALD
C_v','sim_XCOREB_v','sim_XSHEALDB_v','sim_XCOREC_v','sim_XSHEALDA_v','Az'},
...
        'blocksize','auto');
% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;
% Plot solution
postplot(fem, ...
        'tridata',{'T','cont','internal','unit','degC'}, ...
        'trimap','jet(1024)', ...
        'title','Surface: Temperature [degC]', ...
        'axis',[-0.21784184372858126,0.21784184372858126,-
0.11224297464016442,0.11224297464016464]);
% Запись текущего значения температуры в центре жили в массив T1
T1(n)=postint(fem,'T', ...
        'unit','degC', ...
        'recover','off', ...
        'dl',[30], ...
        'edim',0);
end
plot(R, T1); % Построение графика

```

Приложение К

(обязательное)

Текст в окне SPICE Circuit Editor программы COMSOL Multiphysics для компьютерной модели кабельной линии с транспозицией экранов

```
IsourceA 0 1 1
```

```
IsourceB 0 2 1
```

```
IsourceC 0 3 1
```

```
XCoreA1 1 4 CoreA1
```

```
.SUBCKT CoreA1 IgA1 UgA1 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreB1 2 5 CoreB1
```

```
.SUBCKT CoreB1 IgB1 UgB1 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreC1 3 6 CoreC1
```

```
.SUBCKT CoreC1 IgC1 UgC1 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreA2 4 7 CoreA2
```

```
.SUBCKT CoreA2 IgA2 UgA2 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreB2 5 8 CoreB2
```

```
.SUBCKT CoreB2 IgB2 UgB2 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreC2 6 9 CoreC2
```

```
.SUBCKT CoreC2 IgC2 UgC2 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreA3 7 10 CoreA3
```

```
.SUBCKT CoreA3 IgA3 UgA3 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

```
XCoreB3 8 10 CoreB3
```

```
.SUBCKT CoreB3 IgB3 UgB3 COMSOL: *
```

```
.ENDS
```

XCoreC3 9 10 CoreC3

.SUBCKT CoreC3 IgC3 UgC3 COMSOL: *

.ENDS

XShealdA1 0 11 ShealdA1

.SUBCKT ShealdA1 IeA1 UeA1 COMSOL: *

.ENDS

XShealdB1 0 12 ShealdB1

.SUBCKT ShealdB1 IeB1 UeB1 COMSOL: *

.ENDS

XShealdC1 0 13 ShealdC1

.SUBCKT ShealdC1 IeC1 UeC1 COMSOL: *

.ENDS

XShealdA2 13 14 ShealdA2

.SUBCKT ShealdA2 IeA2 UeA2 COMSOL: *

.ENDS

XShealdB2 11 15 ShealdB2

.SUBCKT ShealdB2 IeB2 UeB2 COMSOL: *

.ENDS

XShealdC2 12 16 ShealdC2

.SUBCKT ShealdC2 IeC2 UeC2 COMSOL: *

.ENDS

XShealdA3 16 10 ShealdA3

.SUBCKT ShealdA3 IeA3 UeA3 COMSOL: *

.ENDS

XShealdB3 14 10 ShealdB3

.SUBCKT ShealdB3 IeB3 UeB3 COMSOL: *

.ENDS

XShealdC3 15 10 ShealdC3

.SUBCKT ShealdC3 IeC3 UeC3 COMSOL: *

.ENDS

XGround1 0 17 Ground1

.SUBCKT Ground1 Igr1 Ugr1 COMSOL: *

.ENDS

XGround2 17 18 Ground2

.SUBCKT Ground2 Igr2 Ugr2 COMSOL: *

.ENDS

XGround3 18 10 Ground3

.SUBCKT Ground3 Igr3 Ugr3 COMSOL: *

.ENDS

Приложение Л
(обязательное)

Математический алгоритм для расчёта температур жил однофазных кабелей в одном сечении КЛ в режиме реального времени, написанный в программе MATLAB

%% 1. ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

f=50; %Частота тока, Гц

%Параметры жилы

r1=0.0428/2;% Радиус жилы, м

gammaCu=58100000; %Удельная электрическая проводимость, См/м

alfaCu=0.0039; %Температурный коэффициент сопротивления меди, 1/К

ssu=384.18; %Удельная теплоемкость меди, Дж/(кг*К)

Pcu=8960; % Плотность меди, кг/м³

Sg_Cu=0.0012; %Площадь сечения меди в жиле (по каталогу), мм²

k_sg=1; %Коэффициент влияния конструкции жилы на поверхностный эффект

k_pg=1; %Коэффициент влияния конструкции жилы на эффект близости

%Параметры изоляции

r2=0.0938/2;% Наружный радиус внутренней изоляции, м

lymda_pe=0.235; %Удельная теплопроводность полиэтилена, Вт/(м*К)

Ppe=930; % Плотность полиэтилена, кг/м³

spe=2350; %Удельная теплоемкость полиэтилена, Дж/(кг*К)

h=864; T1=180*86400; k=1; %Установка шага по времени, предела по времени и индекса

%% 2. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

% Расчёт активного сопротивления жилы постоянному току с учётом

% коэффициента заполнения

Sg=pi*r1^2; %Общая площадь сечения жилы, мм²

gamma_g_ekv=gammaCu*Sg_Cu/Sg;%Эквивалентная электрическая проводимость жилы при температуре 20 гр. Цельсия, См/м

Rg=1/(gamma_g_ekv*Sg); %Сопротивление жилы постоянному току при температуре 20 гр. Цельсия, Ом/м

% Расчёт параметров тепловой схемы замещения

r12=sqrt(r1*r2); %Промежуточный радиус изоляции, м

$R_{ti} = \log(r_{12}/r_1) / (2 * \pi * \lambda_{pe})$; %Тепловое сопротивление 1 из 2 слоёв изоляции, Вт/(м*К)

$C_g = c_{cu} * \rho_{cu} * \pi * r_1^2$; %Теплоёмкость жилы, Дж/(м*К)

$C_{i1} = c_{pe} * \rho_{pe} * \pi * (r_{12}^2 - r_1^2)$; %Тепловая ёмкость первого слоя изоляции, Дж/(м*К)

$C_{i2} = c_{pe} * \rho_{pe} * \pi * (r_2^2 - r_{12}^2)$; %Тепловая ёмкость второго слоя изоляции, Дж/(м*К)

$p_{wi} = 1 / (2 * \log(r_{12}/r_1)) - 1 / ((r_{12}/r_1)^2 - 1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для изоляции, отн. ед.

$C_1 = C_g + p_{wi} * C_{i1}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

$C_2 = (1 - p_{wi}) * C_{i1} + p_{wi} * C_{i2}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

%% 3. СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$I_{gA} = p_{dIgA} * I_{gA}(k) / \sqrt{2}$; $I_{gB} = p_{dIgB} * I_{gB}(k) / \sqrt{2}$; $I_{gC} = p_{dIgC} * I_{gC}(k) / \sqrt{2}$; %Модули действующих значений токов в жилах

$T_{sA} = p_{dT_{sA}} * T_{sA}(k)$; $T_{sB} = p_{dT_{sB}} * T_{sB}(k)$; $T_{sC} = p_{dT_{sC}} * T_{sC}(k)$; %Начальные значения температур экранов кабелей

$T_{gA1} = 0$; $T_{gB1} = 0$; $T_{gC1} = 0$; $tt = 0$; $tt(k) = 0$; $P_{gA1} = 0$; $P_{gB1} = 0$;

$P_{gC1} = 0$; %Обнуление массивов

%% 4. РАСЧЕТ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ И НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

$P_{gA0} = 0$; $P_{gB0} = 0$; $P_{gC0} = 0$; %Начальные тепловыделения в жилах (0-)

$T_{gA} = T_{sA} + P_{gA0} * 2 * R_{ti}$; $T_{gB} = T_{sB} + P_{gB0} * 2 * R_{ti}$; $T_{gC} = T_{sC} + P_{gC0} * 2 * R_{ti}$; %Температуры жил в начальный момент времени (0-)

$T_{gA1}(k) = T_{gA}$; $T_{gB1}(k) = T_{gB}$; $T_{gC1}(k) = T_{gC}$; %Запись с общий массив данных

$U_{c2A} = T_{sA} + P_{gA0} * R_{ti}$; $U_{c2B} = T_{sB} + P_{gB0} * R_{ti}$; $U_{c2C} = T_{sC} + P_{gC0} * R_{ti}$; %Потенциал на второй ёмкости в исходной схеме замещения, К

%Расчёт активных сопротивлений переменному току с учётом температурного коэффициента сопротивления

$x_{sgA} = \sqrt{8 * \pi * f * k_{sg} * (10^{-7}) / (R_{g_} * (1 + \alpha_{Cu} * (T_{gA} - 20)))}$;

$x_{sgB} = \sqrt{8 * \pi * f * k_{sg} * (10^{-7}) / (R_{g_} * (1 + \alpha_{Cu} * (T_{gB} - 20)))}$;

$x_{sgC} = \sqrt{8 * \pi * f * k_{sg} * (10^{-7}) / (R_{g_} * (1 + \alpha_{Cu} * (T_{gC} - 20)))}$;

$x_{pgA} = \sqrt{8 * \pi * f * k_{pg} * (10^{-7}) / (R_{g_} * (1 + \alpha_{Cu} * (T_{gA} - 20)))}$;

$x_{pgB} = \sqrt{8 * \pi * f * k_{pg} * (10^{-7}) / (R_{g_} * (1 + \alpha_{Cu} * (T_{gB} - 20)))}$;

$x_{pgC} = \sqrt{8 * \pi * f * k_{pg} * (10^{-7}) / (R_{g_} * (1 + \alpha_{Cu} * (T_{gC} - 20)))}$;

$$y_{sgA}=(x_{sgA}^4)/(192+0.8*x_{sgA}^4); y_{sgB}=(x_{sgB}^4)/(192+0.8*x_{sgB}^4);$$

$$y_{sgC}=(x_{sgC}^4)/(192+0.8*x_{sgC}^4);$$

$$y_{pgA}=(x_{pgA}^4)/(192+0.8*x_{pgA}^4)*((2*r1/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r1/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{pgA}^4)/(192+0.8*x_{pgA}^4)+0.27));$$

$$y_{pgB}=(x_{pgB}^4)/(192+0.8*x_{pgB}^4)*((2*r1/D)^2)*(0.312*(2*r1/D)^2+1.18/((x_{pgB}^4)/(192+0.8*x_{pgB}^4)+0.27));$$

$$y_{pgC}=(x_{pgC}^4)/(192+0.8*x_{pgC}^4)*((2*r1/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r1/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{pgC}^4)/(192+0.8*x_{pgC}^4)+0.27));$$

$$RgA=Rg_*(1+alfaCu*(TgA-20))*(1+y_{sgA}+y_{pgA}); \% \text{Активное сопротивление жилы переменному току, Ом/м}$$

$$RgB=Rg_*(1+alfaCu*(TgB-20))*(1+y_{sgB}+y_{pgB}); \% \text{Активное сопротивление жилы переменному току, Ом/м}$$

$$RgC=Rg_*(1+alfaCu*(TgC-20))*(1+y_{sgC}+y_{pgC}); \% \text{Активное сопротивление жилы переменному току, Ом/м}$$

% Расчёт тепловыделений и начальных токов в ёмкостях

$$PgA=IgA^2*RgA; PgB=IgB^2*RgB; PgC=IgC^2*RgC;$$

$$ic1A=PgA; ic1B=PgB; ic1C=PgB;$$

$$ic2A=0; ic2B=0; ic2C=0;$$

% Расчёт сопротивлений дискретной модели

$$Rc1=h/(2*C1); \% \text{для ёмкости 1}$$

$$Rc2=h/(2*C2); \% \text{для ёмкости 2}$$

% ЦИКЛ РАСЧЁТА МОДЕЛИ

for t=h:h:T1

k=k+1; tt(k)=t;

%% 5. СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$$IgA=pdIgA.IgA(k)/\sqrt{2}; IgB=pdIgB.IgB(k)/\sqrt{2};$$

$$IgC=pdIgC.IgC(k)/\sqrt{2}; \% \text{Модули действующих значений токов в жилах}$$

$$TsA=pdTA.TAe(k); TsB=pdTB.TBe(k); TsC=pdTC.TCe(k); \% \text{Начальные значения температур экранов кабелей}$$

%% 6. РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

%Расчёт активных сопротивлений переменному току

$x_{sgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gA} - 20)))}$;

$x_{sgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gB} - 20)))}$;

$x_{sgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gC} - 20)))}$;

$x_{pgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gA} - 20)))}$;

$x_{pgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gB} - 20)))}$;

$x_{pgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gC} - 20)))}$;

$y_{sgA} = (x_{sgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgA}^4)$;

$y_{sgB} = (x_{sgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgB}^4)$;

$y_{sgC} = (x_{sgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgC}^4)$;

$y_{pgA} = (x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) \cdot ((2 \cdot r / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot$

$\cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgA}^4) /$

$/(192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) + 0.27))$;

$y_{pgB} = (x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) \cdot ((2 \cdot r / D)^2) \cdot$

$\cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) + 0.27))$;

$y_{pgC} = (x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) \cdot ((2 \cdot r / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot$

$\cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgC}^4) /$

$/(192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) + 0.27))$;

$R_{gA} = R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gA} - 20)) \cdot (1 + y_{sgA} + y_{pgA})$; %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20 гр.Ц.

$R_{gB} = R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gB} - 20)) \cdot (1 + y_{sgB} + y_{pgB})$; %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20 гр.Ц.

$R_{gC} = R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gC} - 20)) \cdot (1 + y_{sgC} + y_{pgC})$; %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20 гр.Ц.

$P_{gA} = I_{gA}^2 \cdot R_{gA}$; $P_{gB} = I_{gB}^2 \cdot R_{gB}$; $P_{gC} = I_{gC}^2 \cdot R_{gC}$; %Тепловыделения в жилах, Вт/м

%% 7. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУР ЖИЛ НА ТЕКУЩЕМ ШАГЕ

ИНТЕГРИРОВАНИЯ

% Расчёт источников дискретной модели

$J_{c1A} = T_{gA} / R_{c1} + i_{c1A}$; $J_{c1B} = T_{gB} / R_{c1} + i_{c1B}$; $J_{c1C} = T_{gC} / R_{c1} + i_{c1C}$; %Величины источников теплового потока в дискретной модели ёмкости C1, Вт/м

$J_{1A} = J_{c1A} + P_{gA}$; $J_{1B} = J_{c1B} + P_{gB}$; $J_{1C} = J_{c1C} + P_{gC}$; %Сложение источников теплового потока, параллельных ёмкости C1

```

Ec2A=Uc2A+ic2A.*Rc2; Ec2B=Uc2B+ic2B.*Rc2; Ec2C=Uc2C+ic2C.*Rc2; %Величины
источников температуры дискретных моделей ёмкости C2, К
E1A=J1A.*Rc1; E1B=J1B.*Rc1; E1C=J1C.*Rc1; %Эквивалентное преобразование
источников теплового потока в источники температуры
% Расчёт модели
fiA=(E1A./(Rc1+Rti)+Ec2A./Rc2+TsA./Rti)./(1./(Rc1+Rti)+1./Rc2+1./Rti); %Текущий
потенциал на ёмкости C2 для фазы A, К
fiB=(E1B./(Rc1+Rti)+Ec2B./Rc2+TsB./Rti)./(1./(Rc1+Rti)+1./Rc2+1./Rti); %Текущий
потенциал на ёмкости C2 для фазы B, К
fiC=(E1C./(Rc1+Rti)+Ec2C./Rc2+TsC./Rti)./(1./(Rc1+Rti)+1./Rc2+1./Rti); %Текущий
потенциал на ёмкости C2 для фазы C, К
ic1A=PgA+(fiA-E1A)./(Rc1+Rti); %Текущий тепловой поток на C1 для фазы A, Вт/м
ic1B=PgB+(fiB-E1B)./(Rc1+Rti); %Текущий тепловой поток на C1 для фазы B, Вт/м
ic1C=PgC+(fiC-E1C)./(Rc1+Rti); %Текущий тепловой поток на C1 для фазы C, Вт/м
ic2A=(fiA-Ec2A)./Rc2; %Текущий тепловой поток на C2 для фазы A, Вт/м
ic2B=(fiB-Ec2B)./Rc2; %Текущий тепловой поток на C2 для фазы B, Вт/м
ic2C=(fiC-Ec2C)./Rc2; %Текущий тепловой поток на C2 для фазы C, Вт/м
TgA=fiA-((fiA-E1A).*Rti)./(Rc1+Rti); %Текущая температура жилы фазы A, К
TgB=fiB-((fiB-E1B).*Rti)./(Rc1+Rti); %Текущая температура жилы фазы B, К
TgC=fiC-((fiC-E1C).*Rti)./(Rc1+Rti); %Текущая температура жилы фазы C, К
TgA1(k)=TgA; TgB1(k)=TgB; TgC1(k)=TgC; %Запись температур жил в общие массивы
данных
Uc2A=fiA; Uc2B=fiB; Uc2C=fiC; %Потенциал на C2 для текущего шага интегрирования
end

```

%% 8. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

```

% Расчёт погрешностей
DgAComs=pdTA.TAg-TgA1;
DgBComs=pdTB.TBg-TgB1;
DgCComs=pdTC.TCg-TgC1;
% Фаза "A"
figure
hold on

```

```
plot(tt./86400,TgA1,'r--')
plot(tt./86400,pdTА.ТАg,'r',tt./86400,pdTА.ТАе,'b')
grid on
title('Температура жилы и экрана фазы "А"')
figure
plot(tt./86400,DgAComs,'r')
grid on
title('Погешость для фазы "А"')
% Фаза "В"
figure
hold on
plot(tt./86400,TgB1,'r--')
plot(tt./86400,pdTВ.ТВg,'r',tt./86400,pdTВ.ТВе,'b')
grid on
title('Температура жилы и экрана фазы "В"')
figure
plot(tt./86400,DgBComs,'r')
grid on
title('Погешость для фазы "В"')
% Фаза "С"
figure
hold on
plot(tt./86400,TgC1,'r--')
plot(tt./86400,pdTС.ТСg,'r',tt./86400,pdTС.ТСе,'b')
grid on
title('Температура жилы и экрана фазы "С"')
figure
plot(tt./86400,DgCComs,'r')
grid on
title('Погешость для фазы "С"')
```

Приложение М

(обязательное)

Математический алгоритм для прогнозирования нагрева жил кабелей в одном сечении
КЛ в режиме реального времени, написанный в программе MATLAB

%% I. ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

f=50; %Частота тока, Гц

%Параметры жилы

r1=0.0428/2;% Радиус жилы, м

gammaCu=58100000; %Удельная электрическая проводимость, См/м

alfaCu=0.0039; %Температурный коэффициент сопротивления меди, 1/К

ssu=384.18; %Удельная теплоемкость меди, Дж/(кг*К)

Pcu=8960; %Плотность меди, кг/м³

Sg_Cu=0.0012; %Площадь сечения меди в жиле (по каталогу), мм²

k_sg=1; %Коэффициент влияния конструкции жилы на поверхностный эффект

k_pg=1; %Коэффициент влияния конструкции жилы на эффект близости

%Параметры изоляции

r2=0.0938/2; %Наружный радиус внутренней изоляции, м

lymda_pe=0.235; %Удельная теплопроводность полиэтилена, Вт/(м*К)

Ppe=930; %Плотность полиэтилена, кг/м³

spe=2350; %Удельная теплоемкость полиэтилена, Дж/(кг*К)

%Параметры экрана

r3=0.0978/2;%Наружный радиус экрана, м

Se_Cu=0.000095; %Площадь сечения меди в экране (по каталогу), мм²

k_se=((r3-r2)/(r3+r2))*(((r3+2*r2)/(r3+r2))^2); %Коэффициент влияния конструкции
экрана на поверхностный эффект

k_pe=0.8; %Коэффициент влияния конструкции экрана на эффект близости

%Параметры оболочки

r4=0.1118/2; %Наружный радиус внешней изоляции, м

D=4*r4; %Расстояние между осями кабелей

%Параметры грунта

lymda_Gr=1; %Теплопроводность грунта, Вт/(м*К)

$c_{Gr}=1250$; %Удельная теплоёмкость грунта, Дж/(кг*К)

$\rho_{Gr}=1600$; %Плотность грунта, кг/м³

%Собственные и взаимные сопротивления тепловым потокам от фаз КЛ (определяются с помощью МКЭ)

$R_{tgA}=1.2995442584$; %Собственное тепловое сопротивление тепловому потоку от экрана фазы "А" в грунте

$R_{tgB}=1.9630485954$; %Собственное тепловое сопротивление тепловому потоку от экрана фазы "В" в грунте

$R_{tgC}=R_{tgA}$; %Собственное тепловое сопротивление тепловому потоку от экрана фазы "С" в грунте

$R_{tAB}=0.9702697197$; %Взаимное тепловое сопротивление между фазами "А" и "В"

$R_{tAC}=3.2696060108$; %Взаимное тепловое сопротивление между фазами "А" и "С"

$R_{tBC}=R_{tAB}$; %Взаимное тепловое сопротивление между фазами "В" и "С"

%% II. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

% Расчёт активных сопротивлений жил и экранов постоянному току с учётом коэффициента заполнения

$S_g=\pi*r_1^2$; %Общая площадь сечения жилы, мм²

$S_e=\pi*(r_3^2-r_2^2)$; %Общая площадь сечения экрана, мм²

$\gamma_{g_ekv}=\gamma_{Cu}*S_{g_Cu}/S_g$; %Эквивалентная электрическая проводимость жилы, См/м

$\gamma_{e_ekv}=\gamma_{Cu}*S_{e_Cu}/S_e$; %Эквивалентная электрическая проводимость экрана, См/м

$R_{g_} = 1/(\gamma_{g_ekv}*S_g)$; %Сопротивление жилы постоянному току при температуре 20 гр. Цельсия

$R_{e_} = 1/(\gamma_{e_ekv}*S_e)$; %Сопротивление экрана постоянному току при температуре 20 гр. Цельсия

%Расчёт параметров схемы замещения

$R_{ti}=\log(r_2/r_1)/(2*\pi*\lambda_{pe})$; %Тепловое сопротивление 1 из 2 слоёв изоляции

$R_{to}=\log(r_4/r_3)/(2*\pi*\lambda_{pe})$; %Тепловое сопротивление внешней оболочки

$R_{tg1A}=(R_{tgA}-R_{to})/4$; %Тепловое сопротивление одного слоя грунта тепловому потоку от оболочки фазы "А"

$R_{tg1B}=(R_{tgB}-R_{to})/4$; %Тепловое сопротивление одного слоя грунта тепловому потоку от оболочки фазы "В"

$R_{tg1C}=R_{tg1A}$; %Тепловое сопротивление одного слоя грунта тепловому потоку от оболочки фазы "С"

$R1=2*R_{tAB}+(R_{tAB}^2)/R_{tgB}$; $R2=R_{tAB}+2*R_{tgB}$; %Промежуточные вычисления

$R3=(R_{tAC}*R1)/(R_{tAC}+R1)+(R_{tgA}*R2)/(R_{tgA}+R2)$; %Промежуточные вычисления

$R_{vhA}=R_{tgA}*R2*R3/(R_{tgA}*R2+R2*R3+R_{tgA}*R3)-R_{to}$; %Входное тепловое сопротивление относительно экрана фазы "А"

$R_{vhB}=(R_{tAB}+R_{tgA})^2*R_{tgB}/((R_{tAB}+R_{tgA})^2+2*R_{tgB}*(R_{tAB}+R_{tgA}))-R_{to}$; %Входное тепловое сопротивление относительно экрана фазы "А"

$rekvA=r4*exp(R_{vhA}*2*pi*lymda_Gr)$; %Эквивалентный внешний радиус эквивалентного цилиндрического теплового поля для фазы "А"

$rekvB=r4*exp(R_{vhB}*2*pi*lymda_Gr)$; %Эквивалентный внешний радиус эквивалентного цилиндрического теплового поля для фазы "В"

$r41A=(r4^3*rekvA)^{(1/4)}$; %Внешний радиус первого слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$r42A=(r4*rekvA)^{(1/2)}$; %Внешний радиус второго слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$r43A=(r4*rekvA^3)^{(1/4)}$; %Внешний радиус третьего слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$r41B=(r4^3*rekvB)^{(1/4)}$; %Внешний радиус первого слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$r42B=(r4*rekvB)^{(1/2)}$; %Внешний радиус второго слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$r43B=(r4*rekvB^3)^{(1/4)}$; %Внешний радиус третьего слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$C_g=c_{cu}*Pl_{cu}*pi*r1^2$; %Теплоёмкость жилы

$C_i=c_{pe}*Pl_{pe}*pi*(r2^2-r1^2)$; %Теплоёмкость изоляции

$C_e=c_{cu}*Pl_{cu}*pi*(r3^2-r2^2)$; %Теплоёмкость экрана

$C_o=c_{pe}*Pl_{pe}*pi*(r4^2-r3^2)$; %Теплоёмкость оболочки

$C_{Gr1A}=c_{Gr}*Pl_{Gr}*pi*(r41A^2-r4^2)$; %Теплоёмкость грунта

$CGr2A=cGr*PIGr*pi*(r42A^2-r41A^2)$; %Теплоёмкость первого слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$CGr3A=cGr*PIGr*pi*(r43A^2-r42A^2)$; %Теплоёмкость второго слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$CGr4A=cGr*PIGr*pi*(rekvA^2-r43A^2)$; %Теплоёмкость третьего слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$CGr1B=cGr*PIGr*pi*(r41B^2-r4^2)$; %Теплоёмкость первого слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$CGr2B=cGr*PIGr*pi*(r42B^2-r41B^2)$; %Теплоёмкость второго слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$CGr3B=cGr*PIGr*pi*(r43B^2-r42B^2)$; %Теплоёмкость третьего слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$CGr4B=cGr*PIGr*pi*(rekvB^2-r43B^2)$; %Теплоёмкость четвёртого слоя грунта для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$pw_i=1/(2*log(r2/r1))-1/((r2/r1)^2-1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для изоляции

$pw_o=1/(2*log(r4/r3))-1/((r4/r3)^2-1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для оболочки

$pwGrA=1/(log(rekvA/r4))-1/((rekvA/r4)-1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для эквивалентного цилиндрического поля фазы "А"

$pwGrB=1/(log(rekvB/r4))-1/((rekvB/r4)-1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для эквивалентного цилиндрического поля фазы "В"

$C1=Cg+pw_i*Ci$; %Теплоёмкость C1 в схеме замещения

$C2=(1-pw_i)*Ci+Ce+pw_o*Co$; %Теплоёмкость C2 в схеме замещения

$C3A=(1-pw_o)*Co+pwGrA*CGr1A$; %Теплоёмкость C3 в схеме замещения для фазы "А"

$C4A=(1-pwGrA)*CGr1A+pwGrA*CGr2A$; %Теплоёмкость C4 в схеме замещения для фазы "А"

$C5A=(1-pwGrA)*CGr2A+pwGrA*CGr3A$; %Теплоёмкость C5 в схеме замещения для фазы "А"

$C6A=(1-pwGrA)*CGr3A+pwGrA*CGr4A$; %Теплоёмкость C6 в схеме замещения для фазы "А"

$C3B=(1-pw_o)*Co+pwGrB*CGr1B$; %Теплоёмкость C3 в схеме замещения для фазы "В"

$C4B=(1-pwGrB)*CGr1B+pwGrB*CGr2B$; %Теплоёмкость C4 в схеме замещения для фазы "В"

$C5B=(1-pwGrB)*CGr2B+pwGrB*CGr3B$; %Теплоёмкость C5 в схеме замещения для фазы "B"

$C6B=(1-pwGrB)*CGr3B+pwGrB*CGr4B$; %Теплоёмкость C6 в схеме замещения для фазы "B"

$C3C=C3A$; %Теплоёмкость C3 в схеме замещения для фазы "C"

$C4C=C4A$; %Теплоёмкость C4 в схеме замещения для фазы "C"

$C5C=C5A$; %Теплоёмкость C5 в схеме замещения для фазы "C"

$C6C=C6A$; %Теплоёмкость C6 в схеме замещения для фазы "C"

%Дополнительные параметры

$h=864$; $T1=180*86400$; $m=T1/h+1$; $k=1$; %Данные для основного щикла расчёта

$h1=864/8$; $eps=0.1$; $j=1$; %Данные для цикла начальных условий

$Tr=86400*2$; $n=1$; %Данные для цикла прогноза

$Uc11A=0$; $Uc11B=0$; $Uc11C=0$; $Uc22A=0$; $Uc22B=0$; $Uc22C=0$; %Обнуление массивов

$Uc33A=0$; $Uc33B=0$; $Uc33C=0$; $Uc44A=0$; $Uc44B=0$; $Uc44C=0$; %Обнуление массивов

$JgA1=0$; $JgB1=0$; $JgC1=0$; $TgApr=0$; $TgVpr=0$; $TgCpr=0$; %Обнуление массивов

$JeA1=0$; $JeB1=0$; $JeC1=0$; $TeApr=0$; $TeVpr=0$; $TeCpr=0$; %Обнуление массивов

$tt=0$; $tt1=0$; %Обнуление массивов

%% III. СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$IgA=pdIgA.IgA(k)/sqrt(2)$; $IgB=pdIgB.IgB(k)/sqrt(2)$; $IgC=pdIgC.IgC(k)/sqrt(2)$; %Модули действующих значений токов в жилах

$IeA=pdIeA.IeA(k)/sqrt(2)$; $IeB=pdIeB.IeB(k)/sqrt(2)$; $IeC=pdIeC.IeC(k)/sqrt(2)$; %Модули действующих значений токов в экранах

$TeA=pdTA.TAe(k)$; $TeV=pdTB.TVe(k)$; $TeC=pdTC.TCe(k)$; %Температуры в экранах

$Evn=10$; %Внешняя температура

%% IV. РАСЧЕТ ИСХОДНЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

$Jg0A=0$; $Je0A=0$; $Jg0B=0$; $Je0B=0$; $Jg0C=0$; $Je0C=0$; %Тепловые потоки от жил и экранов до включения КЛ под нагрузку

$tt1(n)=0$; $tt(k)=0$; %Начальное время

% 1. расчёт начальных тепловых потенциалов на ёмкостях

$Uc1A=Jg0A.*(Rti+Rto+4*Rtg1A)+Je0A.*(Rto+4*Rtg1A)+Evn$; $Uc11A(k)=Uc1A$;

%Начальный потенциал на ёмкости C1 фазы "A"

$U_{c2A}=(J_{g0A}+J_{e0A}).*(R_{to}+4*R_{tg1A})+E_{vn}$; $U_{c22A}(k)=U_{c2A}$; %Начальный потенциал на ёмкости C2 фазы "A"

$U_{c3A}=(J_{g0A}+J_{e0A}).*4*R_{tg1A}+E_{vn}$; $U_{c33A}(k)=U_{c3A}$; %Начальный потенциал на ёмкости C3A

$U_{c4A}=(J_{g0A}+J_{e0A}).*3*R_{tg1A}+E_{vn}$; $U_{c44A}(k)=U_{c4A}$; %Начальный потенциал на ёмкости C4A

$U_{c5A}=(J_{g0A}+J_{e0A}).*2*R_{tg1A}+E_{vn}$; %Начальный потенциал на ёмкости C5A

$U_{c6A}=(J_{g0A}+J_{e0A}).*R_{tg1A}+E_{vn}$; %Начальный потенциал на ёмкости C6A

$U_{c1B}=J_{g0B}.*(R_{ti}+R_{to}+4*R_{tg1B})+J_{e0B}.*(R_{to}+4*R_{tg1B})+E_{vn}$; $U_{c11B}(k)=U_{c1B}$;
%Начальный потенциал на ёмкости C2 фазы "B"

$U_{c2B}=(J_{g0B}+J_{e0B}).*(R_{to}+4*R_{tg1B})+E_{vn}$; $U_{c22B}(k)=U_{c2B}$; %Начальный потенциал на ёмкости C2 фазы "B"

$U_{c3B}=(J_{g0B}+J_{e0B}).*4*R_{tg1B}+E_{vn}$; $U_{c33B}(k)=U_{c3B}$; %Начальный потенциал на ёмкости C3B

$U_{c4B}=(J_{g0B}+J_{e0B}).*3*R_{tg1B}+E_{vn}$; $U_{c44B}(k)=U_{c4B}$; %Начальный потенциал на ёмкости C4B

$U_{c5B}=(J_{g0B}+J_{e0B}).*2*R_{tg1B}+E_{vn}$; %Начальный потенциал на ёмкости C5B

$U_{c6B}=(J_{g0B}+J_{e0B}).*R_{tg1B}+E_{vn}$; %Начальный потенциал на ёмкости C6B

$U_{c1C}=J_{g0C}.*(R_{ti}+R_{to}+4*R_{tg1C})+J_{e0C}.*(R_{to}+4*R_{tg1C})+E_{vn}$; $U_{c11C}(k)=U_{c1C}$;
%Начальный потенциал на ёмкости C2 фазы "C"

$U_{c2C}=(J_{g0C}+J_{e0C}).*(R_{to}+4*R_{tg1C})+E_{vn}$; $U_{c22C}(k)=U_{c2C}$; %Начальный потенциал на ёмкости C2 фазы "C"

$U_{c3C}=(J_{g0C}+J_{e0C}).*4*R_{tg1C}+E_{vn}$; $U_{c33C}(k)=U_{c3C}$; %Начальный потенциал на ёмкости C3C

$U_{c4C}=(J_{g0C}+J_{e0C}).*3*R_{tg1C}+E_{vn}$; $U_{c44B}(k)=U_{c4B}$; %Начальный потенциал на ёмкости C4C

$U_{c5C}=(J_{g0C}+J_{e0C}).*2*R_{tg1C}+E_{vn}$; %Начальный потенциал на ёмкости C5C

$U_{c6C}=(J_{g0C}+J_{e0C}).*R_{tg1C}+E_{vn}$; %Начальный потенциал на ёмкости C6C

% 2. расчёт начальных тепловыделений в жилах и экранах с учётом эффекта близости, поверхностного эффекта и температурного коэффициента сопротивления

$x_{sgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (Rg \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1A - 20)))}$;
 $x_{sgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (Rg \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1B - 20)))}$;
 $x_{sgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (Rg \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1C - 20)))}$;
 $x_{seA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2A - 20)))}$;
 $x_{seB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2B - 20)))}$;
 $x_{seC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2C - 20)))}$;
 $x_{pgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1A - 20)))}$;
 $x_{pgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1B - 20)))}$;
 $x_{pgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1C - 20)))}$;
 $x_{peA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2A - 20)))}$;
 $x_{peB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2B - 20)))}$;
 $x_{peC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2C - 20)))}$;
 $y_{sgA} = (x_{sgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgA}^4)$; $y_{sgB} = (x_{sgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgB}^4)$;
 $y_{sgC} = (x_{sgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgC}^4)$; %Коэффициенты поверхностного эффекта для жил
 фаз "А", "В" и "С" соответственно
 $y_{seA} = (x_{seA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seA}^4)$; $y_{seB} = (x_{seB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seB}^4)$;
 $y_{seC} = (x_{seC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seC}^4)$; %Коэффициенты поверхностного эффекта для
 экранов фаз "А", "В" и "С" соответственно
 $y_{pgA} = (x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 +$
 $1.18 / ((x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для жилы
 фазы "А"
 $y_{pgB} = (x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / D)^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "В"
 $y_{pgC} = (x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 +$
 $1.18 / ((x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для жилы
 фазы "С"
 $y_{peA} = (x_{peA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peA}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 +$
 $1.18 / ((x_{peA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peA}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для экрана
 фазы "А"
 $y_{peB} = (x_{peB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peB}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / D)^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / D)^2 + 1.18 / ((x_{peB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peB}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "В"

$y_{peC} = (x_{peC}^4) / (192 + 0.8 * x_{peC}^4) * ((2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2) * (0.312 * (2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peC}^4) / (192 + 0.8 * x_{peC}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "С"

$RgA = Rg_{*} * (1 + \alpha_{Cu} * (Uc1A - 20)) * (1 + y_{sgA} + y_{pgA});$ %Активное сопротивление жилы фазы "А" переменному току при текущей температуре

$RgB = Rg_{*} * (1 + \alpha_{Cu} * (Uc1B - 20)) * (1 + y_{sgB} + y_{pgB});$ %Активное сопротивление жилы фазы "В" переменному току при текущей температуре

$RgC = Rg_{*} * (1 + \alpha_{Cu} * (Uc1C - 20)) * (1 + y_{sgC} + y_{pgC});$ %Активное сопротивление жилы фазы "С" переменному току при текущей температуре

$ReA = Re_{*} * (1 + \alpha_{Cu} * (Uc2A - 20)) * (1 + y_{seA} + y_{peA});$ %Активное сопротивление экрана фазы "А" переменному току при текущей температуре

$ReB = Re_{*} * (1 + \alpha_{Cu} * (Uc2B - 20)) * (1 + y_{seB} + y_{peB});$ %Активное сопротивление экрана фазы "В" переменному току при текущей температуре

$ReC = Re_{*} * (1 + \alpha_{Cu} * (Uc2C - 20)) * (1 + y_{seC} + y_{peC});$ %Активное сопротивление экрана фазы "С" переменному току при текущей температуре

$JgA = I_gA(k)^2 * RgA;$ $JgB = I_gB(k)^2 * RgB;$ $JgC = I_gC(k)^2 * RgC;$ %Тепловыделения в жилах

$JeA = I_eA(k)^2 * ReA;$ $JeB = I_eB(k)^2 * ReB;$ $JeC = I_eC(k)^2 * ReC;$ %Тепловыделения в экранах

% 3. определение начальных тепловых потоков в ёмкостях

$ic1A = JgA;$ $ic1B = JgB;$ $ic1C = JgB;$ %Начальные тепловые потоки в ёмкостях С1

$ic2A = JeA;$ $ic2B = JeB;$ $ic2C = JeC;$ %Начальные тепловые потоки в ёмкостях С2

$ic3A = 0;$ $ic3B = 0;$ $ic3C = 0;$ %Начальные тепловые потоки в ёмкостях С3

$ic4A = 0;$ $ic4B = 0;$ $ic4C = 0;$ %Начальные тепловые потоки в ёмкостях С4

$ic5A = 0;$ $ic5B = 0;$ $ic5C = 0;$ %Начальные тепловые потоки в ёмкостях С5

$ic6A = 0;$ $ic6B = 0;$ $ic6C = 0;$ %Начальные тепловые потоки в ёмкостях С6

%% V. РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

$Rc1 = h1 / (2 * C1);$ %Дискретное сопротивление ёмкостей 1 для трёх фаз

$Rc2 = h1 / (2 * C2);$ %Дискретное сопротивление ёмкостей 2 для трёх фаз

$Rc3A = h1 / (2 * C3A);$ $Rc3B = h1 / (2 * C3B);$ $Rc3C = Rc3A;$ %Дискретное сопротивление 3х ёмкостей для трёх фаз

$Rc4A = h1 / (2 * C4A);$ $Rc4B = h1 / (2 * C4B);$ $Rc4C = Rc4A;$ %Дискретное сопротивление 4х ёмкостей для трёх фаз


```

0 -1/Rtg1A 2/Rtg1A+1/Rc4A -1/Rtg1A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 -1/Rtg1A 2/Rtg1A+1/Rc5A -1/Rtg1A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 -1/Rtg1A 2/Rtg1A+1/Rc6A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
-1/RtAB 0 0 0 0 1/(Rti+Rc1)+1/Rc2+1/Rto+1/RtAB+1/RtBC -1/Rto 0 0 0 -1/RtBC 0 0 0
0;
0 0 0 0 0 -1/Rto 1/Rto+1/Rc3B+1/Rtg1B -1/Rtg1B 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc4B -1/Rtg1B 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc5B -1/Rtg1B 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc6B 0 0 0 0 0;
-1/RtAC 0 0 0 0 -1/RtBC 0 0 0 0 1/(Rti+Rc1)+1/Rc2+1/Rto+1/RtBC+1/RtAC -1/Rto 0 0
0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rto 1/Rto+1/Rc3C+1/Rtg1C -1/Rtg1C 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc4C -1/Rtg1C 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc5C -1/Rtg1C;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc6C;];

```

%Матрица-столбец правых частей уравнений по методу узловых потенциалов

```

B=[E1A/(Rti+Rc1)+E2A/Rc2; Ec3A/Rc3A; Ec4A/Rc4A; Ec5A/Rc5A;
Ec6A/Rc6A+Evn/Rtg1A;

```

```

E1B/(Rti+Rc1)+E2B/Rc2; Ec3B/Rc3B; Ec4B/Rc4B; Ec5B/Rc5B;
Ec6B/Rc6B+Evn/Rtg1B;

```

```

E1C/(Rti+Rc1)+E2C/Rc2; Ec3C/Rc3C; Ec4C/Rc4C; Ec5C/Rc5C;
Ec6C/Rc6C+Evn/Rtg1C;];

```

fi=A\B; %Тепловые потенциалы в узлах 1-15 дискретной схемы замещения

%Текущие значения тепловых потоков в ёмкостях

```

ic1A=JgA+(fi(1)-E1A)/(Rc1+Rti); ic1B=JgB+(fi(6)-E1B)/(Rc1+Rti); ic1C=JgC+(fi(11)-
E1C)/(Rc1+Rti);

```

```

ic2A=JeA+(fi(1)-E2A)/Rc2; ic2B=JeB+(fi(6)-E2B)/Rc2; ic2C=JeC+(fi(11)-
E2C)/Rc2;

```

```

ic3A=(fi(2)-Ec3A)/Rc3A; ic3B=(fi(7)-Ec3B)/Rc3B; ic3C=(fi(12)-Ec3C)/Rc3C;

```

```

ic4A=(fi(3)-Ec4A)/Rc4A; ic4B=(fi(8)-Ec4B)/Rc4B; ic4C=(fi(13)-Ec4C)/Rc4C;

```

```

ic5A=(fi(4)-Ec5A)/Rc5A; ic5B=(fi(9)-Ec5B)/Rc5B; ic5C=(fi(14)-Ec5C)/Rc5C;

```

```

ic6A=(fi(5)-Ec6A)/Rc6A; ic6B=(fi(10)-Ec6B)/Rc6B; ic6C=(fi(15)-Ec6C)/Rc6C;

```

%Текущие значения тепловых потенциалов на ёмкостях

$U_{c1A} = f_i(1) - (f_i(1) - E_{1A}) \cdot R_{ti} / (R_{c1} + R_{ti}); U_{c1B} = f_i(6) - (f_i(6) - E_{1B}) \cdot R_{ti} / (R_{c1} + R_{ti});$

$U_{c1C} = f_i(11) - (f_i(11) - E_{1C}) \cdot R_{ti} / (R_{c1} + R_{ti});$

$U_{c1A}; U_{c1B}; U_{c1C};$

$U_{c2A} = f_i(1); U_{c2B} = f_i(6); U_{c2C} = f_i(11);$

$U_{c2A}; U_{c2B}; U_{c2C};$

$U_{c3A} = f_i(2); U_{c3B} = f_i(7); U_{c3C} = f_i(12);$

$U_{c4A} = f_i(3); U_{c4B} = f_i(8); U_{c4C} = f_i(13);$

$U_{c5A} = f_i(4); U_{c5B} = f_i(9); U_{c5C} = f_i(14);$

$U_{c6A} = f_i(5); U_{c6B} = f_i(10); U_{c6C} = f_i(15);$

% В) РАСЧЁТ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЙ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ,
ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
СОПРОТИВЛЕНИЯ

$x_{sgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c1A} - 20)))};$

$x_{sgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c1B} - 20)))};$

$x_{sgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c1C} - 20)))};$

$x_{seA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c2A} - 20)))};$

$x_{seB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c2B} - 20)))};$

$x_{seC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c2C} - 20)))};$

$x_{pgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c1A} - 20)))};$

$x_{pgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c1B} - 20)))};$

$x_{pgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c1C} - 20)))};$

$x_{peA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c2A} - 20)))};$

$x_{peB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c2B} - 20)))};$

$x_{peC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (U_{c2C} - 20)))};$

$y_{sgA} = (x_{sgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgA}^4); y_{sgB} = (x_{sgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgB}^4);$

$y_{sgC} = (x_{sgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgC}^4);$ %Коэффициенты поверхностного эффекта для жил
фаз "А", "В" и "С" соответственно

$y_{seA} = (x_{seA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seA}^4); y_{seB} = (x_{seB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seB}^4);$

$y_{seC} = (x_{seC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seC}^4);$ %Коэффициенты поверхностного эффекта для
экранов фаз "А", "В" и "С" соответственно

$y_{pgA} = (x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 * x_{pgA}^4) * ((2 * r1 / (D * \sqrt{2}))^2) * (0.312 * (2 * r1 / (D * \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 * x_{pgA}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "А"

$y_{pgB} = (x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 * x_{pgB}^4) * ((2 * r1 / D)^2) * (0.312 * (2 * r1 / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 * x_{pgB}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "В"

$y_{pgC} = (x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 * x_{pgC}^4) * ((2 * r1 / (D * \sqrt{2}))^2) * (0.312 * (2 * r1 / (D * \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 * x_{pgC}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "С"

$y_{peA} = (x_{peA}^4) / (192 + 0.8 * x_{peA}^4) * ((2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2) * (0.312 * (2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peA}^4) / (192 + 0.8 * x_{peA}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "А"

$y_{peB} = (x_{peB}^4) / (192 + 0.8 * x_{peB}^4) * ((2 * r3 / D)^2) * (0.312 * (2 * r3 / D)^2 + 1.18 / ((x_{peB}^4) / (192 + 0.8 * x_{peB}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "В"

$y_{peC} = (x_{peC}^4) / (192 + 0.8 * x_{peC}^4) * ((2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2) * (0.312 * (2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peC}^4) / (192 + 0.8 * x_{peC}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "С"

$RgA = Rg * (1 + \alpha_{Cu} * (U_{c1A} - 20)) * (1 + y_{sgA} + y_{pgA});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при текущей температуре

$RgB = Rg * (1 + \alpha_{Cu} * (U_{c1B} - 20)) * (1 + y_{sgB} + y_{pgB});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при текущей температуре

$RgC = Rg * (1 + \alpha_{Cu} * (U_{c1C} - 20)) * (1 + y_{sgC} + y_{pgC});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при текущей температуре

$ReA = Re * (1 + \alpha_{Cu} * (U_{c2A} - 20)) * (1 + y_{seA} + y_{peA});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при текущей температуре

$ReB = Re * (1 + \alpha_{Cu} * (U_{c2B} - 20)) * (1 + y_{seB} + y_{peB});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при текущей температуре

$ReC = Re * (1 + \alpha_{Cu} * (U_{c2C} - 20)) * (1 + y_{seC} + y_{peC});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при текущей температуре

$JgA = I_gA(k)^2 * RgA;$ $JgB = I_gB(k)^2 * RgB;$ $JgC = I_gC(k)^2 * RgC;$ %Тепловыделения в жилах

$JeA = I_eA(k)^2 * ReA;$ $JeB = I_eB(k)^2 * ReB;$ $JeC = I_eC(k)^2 * ReC;$ %Тепловыделения в экранах

$j = j + 1;$ %Счётчик

end

Uc11A(k)=Uc1A; Uc11B(k)=Uc1B; Uc11C(k)=Uc1C; %Запись в отдельный массив
 Uc22A(k)=Uc2A; Uc22B(k)=Uc2B; Uc22C(k)=Uc2C; %Запись в отдельный массив
 Uc33A(k)=Uc3A; Uc33B(k)=Uc3B; Uc33C(k)=Uc3C; %Запись в отдельный массив
 Uc44A(k)=Uc4A; Uc44B(k)=Uc4B; Uc44C(k)=Uc4C; %Запись в отдельный массив
 TgApr(n)=Uc1A; TgVpr(n)=Uc1B; TgCpr(n)=Uc1C; %Запись в отдельный массив
 TeApr(n)=Uc2A; TeVpr(n)=Uc2B; TeCpr(n)=Uc2C; %Запись в отдельный массив

%% VII. РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

Rc1=h/(2*C1); %Дискретное сопротивление ёмкостей 1 для трёх фаз

Rc2=h/(2*C2); %Дискретное сопротивление ёмкостей 2 для трёх фаз

Rc3A=h/(2*C3A); Rc3B=h/(2*C3B); Rc3C=Rc3A; %Дискретное сопротивление
 3х ёмкостей для трёх фаз

Rc4A=h/(2*C4A); Rc4B=h/(2*C4B); Rc4C=Rc4A; %Дискретное сопротивление
 4х ёмкостей для трёх фаз

Rc5A=h/(2*C5A); Rc5B=h/(2*C5B); Rc5C=Rc5A; %Дискретное сопротивление
 5х ёмкостей для трёх фаз

Rc6A=h/(2*C6A); Rc6B=h/(2*C6B); Rc6C=Rc6A; %Дискретное сопротивление
 5х ёмкостей для трёх фаз

%% VIII. ЦИКЛ ПОСТОЯННОГО РАСЧЁТА НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

for t=h:h:T1

%% 1. ПРОГНОЗ НАГРЕВА КАБЕЛЯ НА НА ВРЕМЯ $T_p=2$ СУТОК

if mod(tt(k),Tp)==0 %Условие выполнения прогноза

% Запись начальных условий для прогноза

Uc1Ap=Uc1A;Uc2Ap=Uc2A;Uc3Ap=Uc3A;Uc4Ap=Uc4A;Uc5Ap=Uc5A;Uc6Ap=Uc6A;

Uc1Bp=Uc1B;Uc2Bp=Uc2B;Uc3Bp=Uc3B;Uc4Bp=Uc4B;Uc5Bp=Uc5B;Uc6Bp=Uc6B;

Uc1Cp=Uc1C;Uc2Cp=Uc2C;Uc3Cp=Uc3C;Uc4Cp=Uc4C;Uc5Cp=Uc5C;Uc6Cp=Uc6C;

ic1Ap=ic1A;ic2Ap=ic2A;ic3Ap=ic3A;ic4Ap=ic4A;ic5Ap=ic5A;ic6Ap=ic6A;

ic1Bp=ic1B;ic2Bp=ic2B;ic3Bp=ic3B;ic4Bp=ic4B;ic5Bp=ic5B;ic6Bp=ic6B;

ic1Cp=ic1C;ic2Cp=ic2C;ic3Cp=ic3C;ic4Cp=ic4C;ic5Cp=ic5C;ic6Cp=ic6C;

%Запись тепловыделений в жилах и экранах для прогноза

JgAp=JgA; JgBp=JgB; JgCp=JgC;

$J_{eAp}=J_{eA}; J_{eBp}=J_{eB}; J_{eCp}=J_{eC};$

%Запись тепловыделений в отдельные массивы

$J_{gAp1}(n)=J_{gAp}; J_{gBp1}(n)=J_{gBp}; J_{gCp1}(n)=J_{gCp};$

$J_{eAp1}(n)=J_{eAp}; J_{eBp1}(n)=J_{eBp}; J_{eCp1}(n)=J_{eCp};$

%1. ЦИКЛ РАСЧЁТА ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ТЕМПЕРАТУР

for t1=h:h:Tp

if tt(k)==T1 *%Условие прерывания цикла, если закончилось общее время расчёта*

break

end

n=n+1; *%Счётчик индексов массивов*

tt1(n)=tt1(n-1)+h; *%Заполнение массива времени*

% A) РАСЧЕТ ИСТОЧНИКОВ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

$J_{c1A}=U_{c1Ap}/R_{c1}+i_{c1Ap}; J_{c1B}=U_{c1Bp}/R_{c1}+i_{c1Bp}; J_{c1C}=U_{c1Cp}/R_{c1}+i_{c1Cp};$

%Величина источника тока дискретной модели ёмкостей 1 для трёх фаз

$J_{c2A}=U_{c2Ap}/R_{c2}+i_{c2Ap}; J_{c2B}=U_{c2Bp}/R_{c2}+i_{c2Bp}; J_{c2C}=U_{c2Cp}/R_{c2}+i_{c2Cp};$

%Величина источника тока дискретной модели ёмкостей 2 для трёх фаз

$J_{1A}=J_{gAp}+J_{c1A}; J_{1B}=J_{gBp}+J_{c1B}; J_{1C}=J_{gCp}+J_{c1C};$ *%Сложение источников тока около ёмкости 1*

$J_{2A}=J_{eAp}+J_{c2A}; J_{2B}=J_{eBp}+J_{c2B}; J_{2C}=J_{eCp}+J_{c2C};$ *%Сложение источников тока около ёмкости 2*

$E_{1A}=J_{1A} \cdot R_{c1}; E_{1B}=J_{1B} \cdot R_{c1}; E_{1C}=J_{1C} \cdot R_{c1};$ *%Эквивалентное преобразование источников около ёмкости 1*

$E_{2A}=J_{2A} \cdot R_{c2}; E_{2B}=J_{2B} \cdot R_{c2}; E_{2C}=J_{2C} \cdot R_{c2};$ *%Эквивалентное преобразование источников около ёмкости 2*

$E_{c3A}=U_{c3Ap}+i_{c3Ap} \cdot R_{c3A}; E_{c3B}=U_{c3Bp}+i_{c3Bp} \cdot R_{c3B}; E_{c3C}=U_{c3Cp}+i_{c3Cp} \cdot R_{c3C};$

%Величина источника ЭДС дискретной модели 3х ёмкостей для трёх фаз

$E_{c4A}=U_{c4Ap}+i_{c4Ap} \cdot R_{c4A}; E_{c4B}=U_{c4Bp}+i_{c4Bp} \cdot R_{c4B}; E_{c4C}=U_{c4Cp}+i_{c4Cp} \cdot R_{c4C};$

%Величины источников ЭДС дискретных моделей 4х ёмкостей для трёх фаз

$E_{c5A}=U_{c5Ap}+i_{c5Ap} \cdot R_{c5A}; E_{c5B}=U_{c5Bp}+i_{c5Bp} \cdot R_{c5B}; E_{c5C}=U_{c5Cp}+i_{c5Cp} \cdot R_{c5C};$

%Величины источников ЭДС дискретных моделей 5х ёмкостей для трёх фаз

$E_{c6A}=U_{c6Ap}+i_{c6Ap} \cdot R_{c6A}; E_{c6B}=U_{c6Bp}+i_{c6Bp} \cdot R_{c6B}; E_{c6C}=U_{c6Cp}+i_{c6Cp} \cdot R_{c6C};$

%Величины источников ЭДС дискретных моделей 5х ёмкостей для трёх фаз

% Б) РАСЧЁТ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

%Матрица узловых проводимостей

```

A=[1/(Rti+Rc1)+1/Rc2+1/Rto+1/RtAB+1/RtAC -1/Rto 0 0 0 -1/RtAB 0 0 0 0 -1/RtAC 0 0 0
0;
-1/Rto 1/Rto+1/Rc3A+1/Rtg1A -1/Rtg1A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 -1/Rtg1A 2/Rtg1A+1/Rc4A -1/Rtg1A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 -1/Rtg1A 2/Rtg1A+1/Rc5A -1/Rtg1A 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 -1/Rtg1A 2/Rtg1A+1/Rc6A 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
-1/RtAB 0 0 0 0 1/(Rti+Rc1)+1/Rc2+1/Rto+1/RtAB+1/RtBC -1/Rto 0 0 0 -1/RtBC 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 -1/Rto 1/Rto+1/Rc3B+1/Rtg1B -1/Rtg1B 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc4B -1/Rtg1B 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc5B -1/Rtg1B 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc6B 0 0 0 0 0;
-1/RtAC 0 0 0 0 -1/RtBC 0 0 0 0 1/(Rti+Rc1)+1/Rc2+1/Rto+1/RtBC+1/RtAC -1/Rto 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rto 1/Rto+1/Rc3C+1/Rtg1C -1/Rtg1C 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc4C -1/Rtg1C 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc5C -1/Rtg1C;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc6C;];

```

%Матрица-столбец коэффициентов правых частей уравнений по методу узловых потенциалов

```

B=[E1A/(Rti+Rc1)+E2A/Rc2; Ec3A/Rc3A; Ec4A/Rc4A; Ec5A/Rc5A;
Ec6A/Rc6A+Evn/Rtg1A;
E1B/(Rti+Rc1)+E2B/Rc2; Ec3B/Rc3B; Ec4B/Rc4B; Ec5B/Rc5B;
Ec6B/Rc6B+Evn/Rtg1B;
E1C/(Rti+Rc1)+E2C/Rc2; Ec3C/Rc3C; Ec4C/Rc4C; Ec5C/Rc5C;
Ec6C/Rc6C+Evn/Rtg1C;];

```

fi=A\B; %Расчёт узловых потенциалов дискретной схемы замещения

%Текущие значения тепловых потоков в ёмкостях

```

ic1Ap=JgAp+(fi(1)-E1A)/(Rc1+Rti); ic1Bp=JgBp+(fi(6)-E1B)/(Rc1+Rti);
ic1Cp=JgCp+(fi(11)-E1C)/(Rc1+Rti);
ic2Ap=JeAp+(fi(1)-E2A)/Rc2; ic2Bp=JeBp+(fi(6)-E2B)/Rc2; ic2Cp=JeCp+(fi(11)-
E2C)/Rc2;

```

$ic3Ap=(fi(2)-Ec3A)/Rc3A$; $ic3Bp=(fi(7)-Ec3B)/Rc3B$; $ic3Cp=(fi(12)-Ec3C)/Rc3C$;
 $ic4Ap=(fi(3)-Ec4A)/Rc4A$; $ic4Bp=(fi(8)-Ec4B)/Rc4B$; $ic4Cp=(fi(13)-Ec4C)/Rc4C$;
 $ic5Ap=(fi(4)-Ec5A)/Rc5A$; $ic5Bp=(fi(9)-Ec5B)/Rc5B$; $ic5Cp=(fi(14)-Ec5C)/Rc5C$;
 $ic6Ap=(fi(5)-Ec6A)/Rc6A$; $ic6Bp=(fi(10)-Ec6B)/Rc6B$; $ic6Cp=(fi(15)-Ec6C)/Rc6C$;

%Текущие значения тепловых потенциалов на ёмкостях

$Uc1Ap=fi(1)-(fi(1)-E1A).*Rti./(Rc1+Rti)$; $Uc1Bp=fi(6)-(fi(6)-E1B).*Rti./(Rc1+Rti)$;
 $Uc1Cp=fi(11)-(fi(11)-E1C).*Rti./(Rc1+Rti)$;

$TgApr(n)=Uc1Ap$; $TgBpr(n)=Uc1Bp$; $TgCpr(n)=Uc1Cp$;

$Uc2Ap=fi(1)$; $TeApr(n)=Uc2Ap$; $Uc2Bp=fi(6)$; $TeBpr(n)=Uc2Bp$; $Uc2Cp=fi(11)$;

$TeCpr(n)=Uc2Cp$;

$Uc3Ap=fi(2)$; $Uc3Bp=fi(7)$; $Uc3Cp=fi(12)$;

$Uc4Ap=fi(3)$; $Uc4Bp=fi(8)$; $Uc4Cp=fi(13)$;

$Uc5Ap=fi(4)$; $Uc5Bp=fi(9)$; $Uc5Cp=fi(14)$;

$Uc6Ap=fi(5)$; $Uc6Bp=fi(10)$; $Uc6Cp=fi(15)$;

**% В) РАСЧЁТ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЙ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ,
 ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
 СОПРОТИВЛЕНИЯ**

$x_sgA=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Ap-20))))$;

$x_sgB=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Bp-20))))$;

$x_sgC=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Cp-20))))$;

$x_seA=sqrt(8*pi*f*k_se*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(Uc2Ap-20))))$;

$x_seB=sqrt(8*pi*f*k_se*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(Uc2Bp-20))))$;

$x_seC=sqrt(8*pi*f*k_se*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(Uc2Cp-20))))$;

$x_pgA=sqrt(8*pi*f*k_pg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Ap-20))))$;

$x_pgB=sqrt(8*pi*f*k_pg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Bp-20))))$;

$x_pgC=sqrt(8*pi*f*k_pg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Cp-20))))$;

$x_peA=sqrt(8*pi*f*k_pe*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(Uc2Ap-20))))$;

$x_peB=sqrt(8*pi*f*k_pe*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(Uc2Bp-20))))$;

$x_peC=sqrt(8*pi*f*k_pe*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(Uc2Cp-20))))$;

$y_sgA=(x_sgA^4)/(192+0.8*x_sgA^4)$; $y_sgB=(x_sgB^4)/(192+0.8*x_sgB^4)$;

$y_sgC=(x_sgC^4)/(192+0.8*x_sgC^4)$; **%Коэффициенты поверхностного эффекта для жил
 фаз "А", "В" и "С" соответственно**

$$y_{seA}=(x_{seA}^4)/(192+0.8*x_{seA}^4); y_{seB}=(x_{seB}^4)/(192+0.8*x_{seB}^4);$$

$y_{seC}=(x_{seC}^4)/(192+0.8*x_{seC}^4);$ %Коэффициенты поверхностного эффекта для экранов фаз "А", "В" и "С" соответственно

$$y_{pgA}=(x_{pgA}^4)/(192+0.8*x_{pgA}^4)*((2*r1/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r1/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{pgA}^4)/(192+0.8*x_{pgA}^4)+0.27));$$
 %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "А"

$$y_{pgB}=(x_{pgB}^4)/(192+0.8*x_{pgB}^4)*((2*r1/D)^2)*(0.312*(2*r1/D)^2+1.18/((x_{pgB}^4)/(192+0.8*x_{pgB}^4)+0.27));$$
 %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "В"

$$y_{pgC}=(x_{pgC}^4)/(192+0.8*x_{pgC}^4)*((2*r1/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r1/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{pgC}^4)/(192+0.8*x_{pgC}^4)+0.27));$$
 %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "С"

$$y_{peA}=(x_{peA}^4)/(192+0.8*x_{peA}^4)*((2*r3/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r3/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{peA}^4)/(192+0.8*x_{peA}^4)+0.27));$$
 %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "А"

$$y_{peB}=(x_{peB}^4)/(192+0.8*x_{peB}^4)*((2*r3/D)^2)*(0.312*(2*r3/D)^2+1.18/((x_{peB}^4)/(192+0.8*x_{peB}^4)+0.27));$$
 %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "В"

$$y_{peC}=(x_{peC}^4)/(192+0.8*x_{peC}^4)*((2*r3/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r3/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{peC}^4)/(192+0.8*x_{peC}^4)+0.27));$$
 %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "С"

$$RgAp=Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Ap-20))*(1+y_{sgA}+y_{pgA});$$
 %Активное сопротивление жилы фазы "А" переменному току при текущей температуре

$$RgBp=Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Bp-20))*(1+y_{sgB}+y_{pgB});$$
 %Активное сопротивление жилы фазы "В" переменному току при текущей температуре

$$RgCp=Rg_*(1+alfaCu*(Uc1Cp-20))*(1+y_{sgC}+y_{pgC});$$
 %Активное сопротивление жилы фазы "С" переменному току при текущей температуре

$$ReAp=Re_*(1+alfaCu*(Uc2Ap-20))*(1+y_{seA}+y_{peA});$$
 %Активное сопротивление экрана фазы "А" переменному току при текущей температуре

$$ReBp=Re_*(1+alfaCu*(Uc2Bp-20))*(1+y_{seB}+y_{peB});$$
 %Активное сопротивление экрана фазы "В" переменному току при текущей температуре

$$ReCp=Re_*(1+alfaCu*(Uc2Cp-20))*(1+y_{seC}+y_{peC});$$
 %Активное сопротивление экрана фазы "С" переменному току при текущей температуре

%Условия для расчёта тепловыделений за последние сутки перед прогнозом

```

if n < Tr/h %Если это первые двое суток работы алгоритма, то
u=n; %берём индекс u так, чтобы учитывался ток за первые двое суток
else %Если это не первые сутки работы алгоритма, то
u=n-Tr/h+2; %берём индекс u так, чтобы учитывать ток за прошлые двое суток
end
JgAp=(pdIgA.IgA(u)./sqrt(2))^2*RgAp; JgBp=(pdIgB.IgB(u)./sqrt(2))^2*RgBp;
JgCp=(pdIgC.IgC(u)./sqrt(2))^2*RgCp; %Тепловыделения в жилах
JeAp=(pdIeA.IeA(u)./sqrt(2))^2*ReAp; JeBp=(pdIeB.IeB(u)./sqrt(2))^2*ReBp;
JeCp=(pdIeC.IeC(u)./sqrt(2))^2*ReCp; %Тепловыделения в экранах
end
end
k=k+1; tt(k)=t; %Счётчик индексов и запись текущего времени в отдельный массив
%% 2. РАСЧЁТ ТЕКУЩИХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
% А) РАСЧЁТ ИСТОЧНИКОВ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ
Jc1A=Uc1A./Rc1+ic1A; Jc1B=Uc1B./Rc1+ic1B; Jc1C=Uc1C./Rc1+ic1C; %Величины
источников тока дискретной модели ёмкостей 1 для трёх фаз
Uc2A=TeA; Uc2B=TeB; Uc2C=TeC; %Потенциалы на ёмкостях C2 для трёх фаз на k-1
шаге интегрирования
Jc2A=Uc2A./Rc2+ic2A; Jc2B=Uc2B./Rc2+ic2B; Jc2C=Uc2C./Rc2+ic2C;%Величины
источников тока дискретных моделей ёмкостей 2 для трёх фаз
J1A=JgA+Jc1A; J1B=JgB+Jc1B; J1C=JgC+Jc1C; %Сложение источников тока около
ёмкости 1
J2A=Jc2A+JeA; J2B=Jc2B+JeB; J2C=Jc2C+JeC; %Сложение источников тока около
ёмкости 2
E1A=J1A.*Rc1; E1B=J1B.*Rc1; E1C=J1C.*Rc1; %Эквивалентное преобразование
источников около ёмкости 1
E2A=J2A.*Rc2; E2B=J2B.*Rc2; E2C=J2C.*Rc2; %Эквивалентное преобразование
источников около ёмкости 2
Ec3A=Uc3A+ic3A*Rc3A; Ec3B=Uc3B+ic3B*Rc3B; Ec3C=Uc3C+ic3C*Rc3C;
%Величины источников ЭДС дискретных моделей 3х ёмкостей для трёх фаз
Ec4A=Uc4A+ic4A*Rc4A; Ec4B=Uc4B+ic4B*Rc4B; Ec4C=Uc4C+ic4C*Rc4C;
%Величины источников ЭДС дискретных моделей 4х ёмкостей для трёх фаз

```

$E_{c5A}=U_{c5A}+i_{c5A}*R_{c5A}$; $E_{c5B}=U_{c5B}+i_{c5B}*R_{c5B}$; $E_{c5C}=U_{c5C}+i_{c5C}*R_{c5C}$;

%Величины источников ЭДС дискретных моделей 5х ёмкостей для трёх фаз

$E_{c6A}=U_{c6A}+i_{c6A}*R_{c6A}$; $E_{c6B}=U_{c6B}+i_{c6B}*R_{c6B}$; $E_{c6C}=U_{c6C}+i_{c6C}*R_{c6C}$;

%Величины источников ЭДС дискретных моделей 5х ёмкостей для трёх фаз

% Б) СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$I_{gA}=pdI_{gA}.I_{gA}(k)/\sqrt{2}$; $I_{gB}=pdI_{gB}.I_{gB}(k)/\sqrt{2}$; $I_{gC}=pdI_{gC}.I_{gC}(k)/\sqrt{2}$; %Модули действующих значений токов в жилах

$I_{eA}=pdI_{eA}.I_{eA}(k)/\sqrt{2}$; $I_{eB}=pdI_{eB}.I_{eB}(k)/\sqrt{2}$; $I_{eC}=pdI_{eC}.I_{eC}(k)/\sqrt{2}$; %Модули действующих значений токов в экранах

$T_{eA}=pdT_{eA}.T_{eA}(k)$; $T_{eB}=pdT_{eB}.T_{eB}(k)$; $T_{eC}=pdT_{eC}.T_{eC}(k)$; %Температуры в экранах

$E_{vn}=10$; %Внешняя температура

% В) РАСЧЁТ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

%Текущие значения потенциалов и токов в ёмкостях C1 и C2

$U_{c1A}=pdT_{eA}.T_{eA}(k)-(pdT_{eA}.T_{eA}(k)-E_{1A})*R_{ti}/(R_{c1}+R_{ti})$; $U_{c1B}=pdT_{eB}.T_{eB}(k)-(pdT_{eB}.T_{eB}(k)-E_{1B})*R_{ti}/(R_{c1}+R_{ti})$; $U_{c1C}=pdT_{eC}.T_{eC}(k)-(pdT_{eC}.T_{eC}(k)-E_{1C})*R_{ti}/(R_{c1}+R_{ti})$;

$U_{c11A}(k)=U_{c1A}$; $U_{c11B}(k)=U_{c1B}$; $U_{c11C}(k)=U_{c1C}$;

$i_{c1A}=J_{gA}+(pdT_{eA}.T_{eA}(k)-E_{1A})/(R_{c1}+R_{ti})$; $i_{c1B}=J_{gB}+(pdT_{eB}.T_{eB}(k)-E_{1B})/(R_{c1}+R_{ti})$;

$i_{c1C}=J_{gC}+(pdT_{eC}.T_{eC}(k)-E_{1C})/(R_{c1}+R_{ti})$;

$U_{c2A}=T_{eA}$; $U_{c2B}=T_{eB}$; $U_{c2C}=T_{eC}$;

$U_{c22A}(k)=U_{c2A}$; $U_{c22B}(k)=U_{c2B}$; $U_{c22C}(k)=U_{c2C}$;

$i_{c2A}=(U_{c2A}-J_{c2A}*R_{c2})/R_{c2}$; $i_{c2B}=(U_{c2B}-J_{c2B}*R_{c2})/R_{c2}$; $i_{c2C}=(U_{c2C}-J_{c2C}*R_{c2})/R_{c2}$;

%Узловая матрица тепловых проводимостей для фазы "А"

$DA=[1/R_{to}+1/R_{c3A}+1/R_{tg1A} \ -1/R_{tg1A} \ 0 \ 0$;

$\ -1/R_{tg1A} \ 2/R_{tg1A}+1/R_{c4A} \ -1/R_{tg1A} \ 0$;

$\ 0 \ -1/R_{tg1A} \ 2/R_{tg1A}+1/R_{c5A} \ -1/R_{tg1A}$;

$\ 0 \ 0 \ -1/R_{tg1A} \ 2/R_{tg1A}+1/R_{c6A}$;];

%Матрица правых частей уравнений по методу узловых потенциалов для фазы "А"

$EA=[pdT_{eA}.T_{eA}(k)/R_{to}+E_{c3A}/R_{c3A}$; E_{c4A}/R_{c4A} ; E_{c5A}/R_{c5A} ; $E_{c6A}/R_{c6A}+E_{vn}/R_{tg1A}$;];

%Узловая матрица тепловых проводимостей для фазы "А"

$DB=[1/R_{to}+1/R_{c3B}+1/R_{tg1B} \ -1/R_{tg1B} \ 0 \ 0$;

-1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc4B -1/Rtg1B 0;
 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc5B -1/Rtg1B;
 0 0 -1/Rtg1B 2/Rtg1B+1/Rc6B;];

%Матрица правых частей уравнений по методу узловых потенциалов для фазы "А"
 EB=[pdTB.TBe(k)/Rto+Ec3B/Rc3B; Ec4B/Rc4B; Ec5B/Rc5B; Ec6B/Rc6B+Evn/Rtg1B;];

%Узловая матрица тепловых проводимостей для фазы "А"

DC=[1/Rto+1/Rc3C+1/Rtg1C -1/Rtg1C 0 0;
 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc4C -1/Rtg1C 0;
 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc5C -1/Rtg1C;
 0 0 -1/Rtg1C 2/Rtg1C+1/Rc6C;];

%Матрица правых частей уравнений по методу узловых потенциалов для фазы "А"
 EC=[pdTC.TCe(k)/Rto+Ec3C/Rc3C; Ec4C/Rc4C; Ec5C/Rc5C; Ec6C/Rc6C+Evn/Rtg1C;];
 fiA=DA\EA; fiB=DB\EB; fiC=DC\EC; %Тепловые потенциалы в узлах 2-5, 6-10, 12-15
 дискретных моделей тепловых схем замещения для эквивалентных грунтов

%Текущие значения тепловых потоков в ёмкостях

ic3A=(fiA(1)-Ec3A)/Rc3A; ic3B=(fiB(1)-Ec3B)/Rc3B; ic3C=(fiC(1)-Ec3C)/Rc3C;
 ic4A=(fiA(2)-Ec4A)/Rc4A; ic4B=(fiB(2)-Ec4B)/Rc4B; ic4C=(fiC(2)-Ec4C)/Rc4C;
 ic5A=(fiA(3)-Ec5A)/Rc5A; ic5B=(fiB(3)-Ec5B)/Rc5B; ic5C=(fiC(3)-Ec5C)/Rc5C;
 ic6A=(fiA(4)-Ec6A)/Rc6A; ic6B=(fiB(4)-Ec6B)/Rc6B; ic6C=(fiC(4)-Ec6C)/Rc6C;

%Текущие значения тепловых потенциалов на ёмкостях

Uc3A=fiA(1); Uc3B=fiB(1); Uc3C=fiC(1);
 Uc33A(k)=Uc3A; Uc33B(k)=Uc3B; Uc33C(k)=Uc3C;
 Uc4A=fiA(2); Uc4B=fiB(2); Uc4C=fiC(2);
 Uc44A(k)=Uc4A; Uc44B(k)=Uc4B; Uc44C(k)=Uc4C;
 Uc5A=fiA(3); Uc5B=fiB(3); Uc5C=fiC(3);
 Uc6A=fiA(4); Uc6B=fiB(4); Uc6C=fiC(4);

% Г) РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ,
 ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
 СОПРОТИВЛЕНИЯ

x_sgA=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1A-20))));
 x_sgB=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1B-20))));
 x_sgC=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(Uc1C-20))));

$x_{seA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2A - 20)))}$;
 $x_{seB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2B - 20)))}$;
 $x_{seC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2C - 20)))}$;
 $x_{pgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1A - 20)))}$;
 $x_{pgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1B - 20)))}$;
 $x_{pgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc1C - 20)))}$;
 $x_{peA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2A - 20)))}$;
 $x_{peB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2B - 20)))}$;
 $x_{peC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{\cdot} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (Uc2C - 20)))}$;
 $y_{sgA} = (x_{sgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgA}^4)$; $y_{sgB} = (x_{sgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgB}^4)$;
 $y_{sgC} = (x_{sgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgC}^4)$; %Коэффициенты поверхностного эффекта для жил фаз "А", "В" и "С" соответственно
 $y_{seA} = (x_{seA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seA}^4)$; $y_{seB} = (x_{seB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seB}^4)$;
 $y_{seC} = (x_{seC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seC}^4)$; %Коэффициенты поверхностного эффекта для экранов фаз "А", "В" и "С" соответственно
 $y_{pgA} = (x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "А"
 $y_{pgB} = (x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / D)^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "В"
 $y_{pgC} = (x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для жилы фазы "С"
 $y_{peA} = (x_{peA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peA}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peA}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "А"
 $y_{peB} = (x_{peB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peB}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / D)^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / D)^2 + 1.18 / ((x_{peB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peB}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "В"
 $y_{peC} = (x_{peC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peC}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peC}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости для экрана фазы "С"

$RgA=Rg_{*}(1+alfaCu*(Uc1A-20))*(1+y_{sgA}+y_{pgA});$ %Активное сопротивление жилы фазы "А" переменному току при текущей температуре

$RgB=Rg_{*}(1+alfaCu*(Uc1B-20))*(1+y_{sgB}+y_{pgB});$ %Активное сопротивление жилы фазы "В" переменному току при текущей температуре

$RgC=Rg_{*}(1+alfaCu*(Uc1C-20))*(1+y_{sgC}+y_{pgC});$ %Активное сопротивление жилы фазы "С" переменному току при текущей температуре

$ReA=Re_{*}(1+alfaCu*(Uc2A-20))*(1+y_{seA}+y_{peA});$ %Активное сопротивление экрана фазы "А" переменному току при текущей температуре

$ReB=Re_{*}(1+alfaCu*(Uc2B-20))*(1+y_{seB}+y_{peB});$ %Активное сопротивление экрана фазы "В" переменному току при текущей температуре

$ReC=Re_{*}(1+alfaCu*(Uc2C-20))*(1+y_{seC}+y_{peC});$ %Активное сопротивление экрана фазы "С" переменному току при текущей температуре

$JgA=IgA^2*RgA; JgB=IgB^2*RgB; JgC=IgC^2*RgC;$ %Тепловыделения в жилах

$JeA=IeA^2*ReA; JeB=IeB^2*ReB; JeC=IeC^2*ReC;$ %Тепловыделения в экранах

end

%Расчёт погрешностей

$DgAComs=pdTA.TAg-Uc11A; DeAComs=pdTA.TAe-Uc22A;$ %Погрешности расчёта температур жилы и экрана в режиме реального времени для фазы "А"

$DgBComs=pdTB.TBg-Uc11B; DeBComs=pdTB.TBe-Uc22B;$ %Погрешности расчёта температур жилы и экрана в режиме реального времени для фазы "В"

$DgCComs=pdTC.TCg-Uc11C; DeCComs=pdTC.TCe-Uc22C;$ %Погрешности расчёта температур жилы и экрана в режиме реального времени для фазы "С"

$DgAprComs=pdTA.TAg-TgApr; DeAprComs=pdTA.TAe-TeApr;$ %Погрешности прогноза температур жилы и экрана в режиме реального времени для фазы "А"

$DgVprComs=pdTB.TBg-TgVpr; DeVprComs=pdTB.TBe-TeVpr;$ %Погрешности прогноза температур жилы и экрана в режиме реального времени для фазы "В"

$DgCprComs=pdTC.TCg-TgCpr; DeCprComs=pdTC.TCe-TeCpr;$ %Погрешности прогноза температур жилы и экрана в режиме реального времени для фазы "С"

%% IX ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ

%% Фаза "А"

figure

hold on

```

plot(tt./86400,Uc11A,'r--',tt./86400,Uc22A,'b--')
plot(tt./86400,pdТА.ТАg,'r',tt./86400,pdТА.ТАе,'b')
plot(tt./86400,Uc44A,'k')
grid on
title("Температура жилы и экрана фазы "А")
figure
plot(tt./86400,DgАComs,'r',tt./86400,DeАComs,'b')
grid on
title("Погешость для фазы "А")
figure
plot(tt1./86400,TgApr,'r--',tt1./86400,TeApr,'b--',
',tt./86400,pdТА.ТАg,'r',tt./86400,pdТА.ТАе,'b')
grid on
title("Температура жилы и экрана (прогноз) фазы "А")
figure
plot(tt./86400,DgAprComs,'r',tt./86400,DeAprComs,'b')
grid on
title("Погешость для прогноза фазы "А")
%% Фаза "В"
figure
hold on
plot(tt./86400,Uc11B,'r--',tt./86400,Uc22B,'b--')
plot(tt./86400,pdТВ.ТВg,'r',tt./86400,pdТВ.ТВе,'b')
plot(tt./86400,Uc44B,'k')
grid on
title("Температура жилы и экрана фазы "В")
figure
plot(tt./86400,DgВComs,'r',tt./86400,DeВComs,'b')
grid on
title("Погешость для фазы "В")
figure

```

```

plot(tt1./86400,TgBpr,'r--',tt1./86400,TeBpr,'b--',
'tt./86400,pdTB.TBg,'r',tt./86400,pdTB.TBe,'b')
grid on
title('Температура жилы и экрана (прогноз) фазы "B"')
figure
plot(tt./86400,DgBprComs,'r',tt./86400,DeBprComs,'b')
grid on
title('Погешость для прогноза фазы "B"')
%% Фаза "C"
figure
hold on
plot(tt./86400,Uc11C,'r--',tt./86400,Uc22C,'b--')
plot(tt./86400,pdTC.TCg,'r',tt./86400,pdTC.TCe,'b')
plot(tt./86400,Uc44C,'k')
grid on
title('Температура жилы и экрана фазы "C"')
figure
plot(tt./86400,DgCComs,'r',tt./86400,DeCComs,'b')
grid on
title('Погешость для фазы "C"')
figure
plot(tt1./86400,TgCpr,'r--',tt1./86400,TeCpr,'b--',
'tt./86400,pdTC.TCg,'r',tt./86400,pdTC.TCe,'b')
grid on
title('Температура жилы и экрана (прогноз) фазы "C"')
figure
plot(tt./86400,DgCprComs,'r',tt./86400,DeCprComs,'b')
grid on
title('Погешость для прогноза фазы "C"')

```

Приложение Н
(обязательное)

Математический алгоритм для расчёта температур жил и оценки допустимой токовой нагрузки КЛ, написанный в программе MATLAB

%% 1. ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

f=50; %Частота тока, Гц

%Параметры жилы

r1=0.0428/2; %Радиус жилы, м

gammaCu=58100000; %Удельная электрическая проводимость, См/м

alfaCu=0.0039; %Температурный коэффициент сопротивления меди, 1/К

ssu=384.18; %Удельная теплоемкость меди, Дж/(кг*К)

Pcu=8960; %Плотность меди, кг/м³

Sg_Cu=0.0012; %Площадь сечения меди в жиле (по каталогу), мм²

k_sg=1; %Коэффициент влияния конструкции жилы на поверхностный эффект

k_pg=1; %Коэффициент влияния конструкции жилы на эффект близости

%Параметры изоляции

r2=0.0938/2; %Наружный радиус внутренней изоляции, м

lymda_pe=0.235; %Удельная теплопроводность полиэтилена, Вт/(м*К)

Ppe=930; %Плотность полиэтилена, кг/м³

spe=2350; %Удельная теплоемкость полиэтилена, Дж/(кг*К)

%Параметры экрана

r3=0.0978/2;% Наружный радиус экрана, м

Se_Cu=0.000095; %Площадь сечения меди в экране (по каталогу), мм²

k_se=((r3-r2)/(r3+r2))*(((r3+2*r2)/(r3+r2))^2); %Коэффициент влияния конструкции экрана на поверхностный эффект

k_pe=0.8; %Коэффициент влияния конструкции экрана на эффект близости

%Параметры оболочки

r4=0.1118/2;% Наружный радиус внешней изоляции, м

%Параметры грунта

lymda_Gr=1; %Теплопроводность грунта, Вт/(м*К)

$\tau_A=260,82081811/20*86400$; %Постоянная времени нагрева для фазы "А"

(приблизительная)

$\tau_B=255,119/20*86400$; %Постоянная времени нагрева для фазы "В" (приблизительная)

$\tau_C=\tau_A$; %Постоянные времени нагрева для фазы "С" (приблизительная)

$D=0.1118*2$; %Расстояние между центрами жил соседних кабелей

$L=1.5$; %Глубина прокладки кабелей

$h=864$; $T_1=180*86400$; %Установка шага по времени и предела по времени

$m=86400/h$; %количество измерений в сутки (эта величина нужна для усреднения измеряемых показателей за сутки)

$k=1$; $i=1$; $n=1$; %различные индексы

$D=0.1118*2$; %Расстояние между центрами жил соседних кабелей

$T_0=10$; %Внешняя температура грунта (зависит от сезона: летом 15 гр.Ц. зимой 5 гр.Ц. можно привязать к календарю (есть специальные таблицы зависимости температуры от глубины и месяца для различных городов России))

% ОБНУЛЕНИЕ МАССИВОВ

$tt_1=0$; $tt=0$; %массивы времени

$TeASum=0$; $TeBSum=0$; $TeCSum=0$; %Массивы суммарных температур за сутки

$TeA_{mid}=0$; $TeB_{mid}=0$; $TeC_{mid}=0$; %Массивы средних значений температур за каждые сутки

$PgA_{mid}=0$; $PgB_{mid}=0$; $PgC_{mid}=0$; %Массивы средних значений тепловыделений в жилах за каждые сутки

$PeA_{mid}=0$; $PeB_{mid}=0$; $PeC_{mid}=0$; %Массивы средних значений тепловыделений в экранах за каждые сутки

$kASum=0$; $kBSum=0$; $kCSum=0$; %Массивы суммарных значений коэффициентов токов в экранах за каждые сутки (это отношение тока в экране к току в жиле)

$kA_{mid}=0$; $kB_{mid}=0$; $kC_{mid}=0$; %Массивы средних значений коэффициентов токов в экранах за каждые сутки (это отношение тока в экране к току в жиле)

$PgASum=0$; $PgBSum=0$; $PgCSum=0$; %Массивы суммарных значений тепловыделений в жилах за прошлые сутки

$PeASum=0$; $PeBSum=0$; $PeCSum=0$; %Массивы суммарных значений тепловыделений в экранах за прошлые сутки

RtgrA=0; RtgrB=0; RtgrC=0; %Массивы значений тепловых сопротивлений грунта
тепловым потокам от фаз

IgAdop=0; IgBdop=0; IgCdop=0; %Массивы значений допустимых токов в фазах

TgA1=0; TgB1=0; TgC1=0; %Массивы значений температур жил

PgA1=0; PgB1=0; PgC1=0; %Массивы тепловыделений в жилах

%% 2. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

%Расчёт активного сопротивления жилы постоянному току с учётом коэффициента
заполнения

Sg=pi*r1^2; %Общая площадь сечения жилы, мм²

Se=pi*(r3^2-r2^2); %Общая площадь сечения экрана, мм²

gamma_g_ekv=gammaCu*Sg_Cu/Sg; %Эквивалентная электрическая проводимость
жилы при температуре 20 гр. Цельсия, См/м

gamma_e_ekv=gammaCu*Se_Cu/Se; %Эквивалентная электрическая проводимость
экрана, См/м

Rg_=1/(gamma_g_ekv*Sg); %Сопротивление жилы постоянному току при температуре
20 гр. Цельсия, Ом/м

Re_=1/(gamma_e_ekv*Se); %Сопротивление экрана постоянному току при температуре
20 гр.Ц

%Расчёт параметров тепловой схемы замещения

r12=sqrt(r1*r2); %Промежуточный радиус изоляции, м

Rti=log(r12/r1)/(2*pi*lymda_pe); %Тепловое сопротивление 1 из 2 слоёв изоляции,
Вт/(м*К)

Rto=log(r4/r3)/(2*pi*lymda_pe); %Тепловое сопротивление внешней оболочки

Cg=ccu*Plcu*pi*r1^2; %Теплоёмкость жилы, Дж/(м*К)

Ci1=cpe*Plpe*pi*(r12^2-r1^2); %Тепловая ёмкость первого слоя изоляции, Дж/(м*К)

Ci2=cpe*Plpe*pi*(r2^2-r12^2); %Тепловая ёмкость второго слоя изоляции, Дж/(м*К)

pwi=1/(2*log(r12/r1))-1/((r12/r1)^2-1); %Коэффициент Ван-Вормера для изоляции, отн.
ед.

C1=Cg+pwi*Ci1; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

C2=(1-pwi)*Ci1+pwi*Ci2; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

%Расчёт начальных значений сопротивлений грунта для каждой фазы

dAB=4*r4; %Расстояние между фазами "А" и "В"

$d_{AC}=8*r_4$; %Расстояние между фазами "А" и "С"

$d_{BC}=4*r_4$; %Расстояние между фазами "В" и "С"

$d_{AiB}=\sqrt{d_{AB}^2+4*L^2}$; %Расстояние между фазой "А" и зеркальным изображением фазы "В"

$d_{AiC}=\sqrt{d_{AC}^2+4*L^2}$; %Расстояние между фазой "А" и зеркальным изображением фазы "С"

$d_{BiC}=\sqrt{d_{BC}^2+4*L^2}$; %Расстояние между фазой "В" и зеркальным изображением фазы "С"

$R_{tgrA}(n)=(1/(2*\pi*\lambda_{Gr}))*\log((L/r_4+\sqrt{(L/r_4)^2-1})*(d_{AiB}/d_{AB})*(d_{AiC}/d_{AC}))$;

%Начальное значение теплового сопротивления грунта тепловому потоку от оболочки фазы "А"

$R_{tgrB}(n)=(1/(2*\pi*\lambda_{Gr}))*\log((L/r_4+\sqrt{(L/r_4)^2-1})*(d_{AiB}/d_{AB})*(d_{BiC}/d_{BC}))$;

%Начальное значение теплового сопротивления грунта тепловому потоку от оболочки фазы "В"

$R_{tgrC}(n)=(1/(2*\pi*\lambda_{Gr}))*\log((L/r_4+\sqrt{(L/r_4)^2-1})*(d_{BiC}/d_{BC})*(d_{AiC}/d_{AC}))$;

%Начальное значение теплового сопротивления грунта тепловому потоку от оболочки фазы "С"

%(Эти сопротивления рассчитаны по методике ИЕС 60287. Далее их значения будут уточняться на основе измеряемых параметров в реальном времени.)

%% 3. СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$I_gA=pdI_gA.I_gA(k)/\sqrt{2}$; $I_gB=pdI_gB.I_gB(k)/\sqrt{2}$; $I_gC=pdI_gC.I_gC(k)/\sqrt{2}$; %Модули действующих значений токов в жилах

$I_eA=pdI_eA.I_eA(k)/\sqrt{2}$; $I_eB=pdI_eB.I_eB(k)/\sqrt{2}$; $I_eC=pdI_eC.I_eC(k)/\sqrt{2}$;

$T_sA=pdT_A.T_{Ae}(k)$; $T_sB=pdT_B.T_{Be}(k)$; $T_sC=pdT_C.T_{Ce}(k)$; %Начальные значения температур экранов кабелей

%% 4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

$P_{gA0}=0$; $P_{gB0}=0$; $P_{gC0}=0$; %Начальные тепловыделения в жилах (0-)

$T_{gA}=T_sA+P_{gA0}*2*R_{ti}$; $T_{gB}=T_sB+P_{gB0}*2*R_{ti}$; $T_{gC}=T_sC+P_{gC0}*2*R_{ti}$; %Температура жил в начальный момент времени (0-)

$T_{gA1}(k)=T_{gA}$; $T_{gB1}(k)=T_{gB}$; $T_{gC1}(k)=T_{gC}$; %Запись с общий массив данных

$U_{c2A}=T_sA+P_{gA0}*R_{ti}$; $U_{c2B}=T_sB+P_{gB0}*R_{ti}$; $U_{c2C}=T_sC+P_{gC0}*R_{ti}$; %Потенциал на второй ёмкости в исходной схеме замещения, К

%Расчёт активных сопротивлений переменному току с учётом температурного коэффициента сопротивления

$$x_{sgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gA} - 20)))};$$

$$x_{sgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gB} - 20)))};$$

$$x_{sgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gC} - 20)))};$$

%Промежуточный коэффициент

$$x_{seA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{sA} - 20)))};$$

$$x_{seB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{sB} - 20)))};$$

$$x_{seC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{sC} - 20)))};$$

%Промежуточный коэффициент

$$x_{pgA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gA} - 20)))};$$

$$x_{pgB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gB} - 20)))};$$

$$x_{pgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (R_{g_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{gC} - 20)))};$$

%Промежуточный коэффициент

$$x_{peA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{sA} - 20)))};$$

$$x_{peB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{sB} - 20)))};$$

$$x_{peC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (R_{e_} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{sC} - 20)))};$$

%Промежуточный коэффициент

$$y_{sgA} = (x_{sgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgA}^4); \quad y_{sgB} = (x_{sgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgB}^4);$$

$$y_{sgC} = (x_{sgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgC}^4);$$

%Коэффициенты поверхностного эффекта в жиле

$$y_{seA} = (x_{seA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seA}^4); \quad y_{seB} = (x_{seB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seB}^4);$$

$$y_{seC} = (x_{seC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seC}^4);$$

%Коэффициенты поверхностного эффекта в экране

$$y_{pgA} = (x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) \cdot ((2 \cdot r_1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r_1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) + 0.27));$$

%Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "А"

$$y_{pgB} = (x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) \cdot ((2 \cdot r_1 / D)^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r_1 / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) + 0.27));$$

%Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "В"

$$y_{pgC} = (x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) \cdot ((2 \cdot r_1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r_1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) + 0.27));$$

%Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "С"

$y_{peA}=(x_{peA}^4)/(192+0.8*x_{peA}^4)*((2*r3/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r3/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{peA}^4)/(192+0.8*x_{peA}^4)+0.27));$ %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "А"

$y_{peB}=(x_{peB}^4)/(192+0.8*x_{peB}^4)*((2*r3/D)^2)*(0.312*(2*r3/D)^2+1.18/((x_{peB}^4)/(192+0.8*x_{peB}^4)+0.27));$ %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "В"

$y_{peC}=(x_{peC}^4)/(192+0.8*x_{peC}^4)*((2*r3/(D*\sqrt{2}))^2)*(0.312*(2*r3/(D*\sqrt{2}))^2+1.18/((x_{peC}^4)/(192+0.8*x_{peC}^4)+0.27));$ %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "С"

$RgA=Rg_*(1+alfaCu*(TgA-20))*(1+y_{sgA}+y_{pgA});$ %Активное сопротивление жилы переменному току, Ом/м

$RgB=Rg_*(1+alfaCu*(TgB-20))*(1+y_{sgB}+y_{pgB});$ %Активное сопротивление жилы переменному току, Ом/м

$RgC=Rg_*(1+alfaCu*(TgC-20))*(1+y_{sgC}+y_{pgC});$ %Активное сопротивление жилы переменному току, Ом/м

$ReA=Re_*(1+alfaCu*(TsA-20))*(1+y_{seA}+y_{peA});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 20 гр.Ц.

$ReB=Re_*(1+alfaCu*(TsB-20))*(1+y_{seB}+y_{peB});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 20 гр.Ц.

$ReC=Re_*(1+alfaCu*(TsC-20))*(1+y_{seC}+y_{peC});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 20 гр.Ц.

%Расчёт тепловыделений и начальных токов в ёмкостях

$PgA=I_gA^2*RgA;$ $PgB=I_gB^2*RgB;$ $PgC=I_gC^2*RgC;$

$ic1A=PgA;$ $ic1B=PgB;$ $ic1C=PgB;$

$ic2A=0;$ $ic2B=0;$ $ic2C=0;$

%Расчёт сопротивлений дискретной модели

$Rc1=h/(2*C1);$ %для ёмкости 1

$Rc2=h/(2*C2);$ %для ёмкости 2

%% 5. РАСЧЁТ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ (ПО ИЕС 60287)

%Расчёт активных сопротивлений переменному току с учётом температурного коэффициента сопротивления при температуре 90 гр. Цельсия

$x_{sgAm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{sgBm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{sgCm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{sg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$;

%Промежуточный коэффициент

$x_{seAm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{seBm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{seCm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{se} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$;

%Промежуточный коэффициент

$x_{pgAm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{pgBm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{pgCm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$;

%Промежуточный коэффициент

$x_{peAm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{peBm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$; $x_{peCm} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha Cu \cdot 70))}$;

$y_{sgAm} = (x_{sgAm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgAm}^4)$; $y_{sgBm} = (x_{sgBm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgBm}^4)$;
 $y_{sgCm} = (x_{sgCm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgCm}^4)$; **%Коэффициенты поверхностного эффекта в жиле**

$y_{seAm} = (x_{seAm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seAm}^4)$; $y_{seBm} = (x_{seBm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seBm}^4)$;
 $y_{seCm} = (x_{seCm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seCm}^4)$; **%Коэффициенты поверхностного эффекта в экране**

$y_{pgAm} = (x_{pgAm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgAm}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgAm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgAm}^4) + 0.27))$; **%Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "А"**

$y_{pgBm} = (x_{pgBm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgBm}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / D)^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgBm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgBm}^4) + 0.27))$; **%Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "В"**

$y_{pgCm} = (x_{pgCm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgCm}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgCm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgCm}^4) + 0.27))$; **%Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "С"**

$y_{peAm} = (x_{peAm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peAm}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peAm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peAm}^4) + 0.27))$; **%Коэффициент эффекта близости в экране фазы "А"**

$y_{peBm} = (x_{peBm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peBm}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / D)^2)^2 \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / D)^2 + 1.18 / ((x_{peBm}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peBm}^4) + 0.27))$; **%Коэффициент эффекта близости в экране фазы "В"**

$y_{peCm} = (x_{peCm}^4) / (192 + 0.8 * x_{peCm}^4) * ((2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2) * (0.312 * (2 * r3 / (D * \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peCm}^4) / (192 + 0.8 * x_{peCm}^4) + 0.27));$ %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "С"

$RgAm = Rg_ * (1 + \text{alfaCu} * 70) * (1 + y_{sgAm} + y_{pgAm});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 90 гр.Ц., Ом/м

$RgBm = Rg_ * (1 + \text{alfaCu} * 70) * (1 + y_{sgBm} + y_{pgBm});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 90 гр.Ц., Ом/м

$RgCm = Rg_ * (1 + \text{alfaCu} * 70) * (1 + y_{sgCm} + y_{pgCm});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 90 гр.Ц., Ом/м

$ReAm = Re_ * (1 + \text{alfaCu} * 70) * (1 + y_{seAm} + y_{peAm});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 90 гр.Ц., Ом/м

$ReBm = Re_ * (1 + \text{alfaCu} * 70) * (1 + y_{seBm} + y_{peBm});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 90 гр.Ц., Ом/м

$ReCm = Re_ * (1 + \text{alfaCu} * 70) * (1 + y_{seCm} + y_{peCm});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 90 гр.Ц., Ом/м

%Расчё начальных допустимых токов

$kA(n) = IeA / IgA; kB(n) = IeB / IgB; kC(n) = IeC / IgC;$ %Предварительные значения коэффициентов токов в экранах

$IgAdop(n) = \sqrt{(90 - T0) / (kA(n)^2 * ReAm * (Rto + RtgrA(n)) + RgAm * (2 * Rti + Rto + RtgrA(n)))};$
%Начальное значение допустимого тока жилы фазы "А"

$IgBdop(n) = \sqrt{(90 - T0) / (kB(n)^2 * ReBm * (Rto + RtgrB(n)) + RgBm * (2 * Rti + Rto + RtgrB(n)))};$
%Начальное значение допустимого тока жилы фазы "В"

$IgCdop(n) = \sqrt{(90 - T0) / (kC(n)^2 * ReCm * (Rto + RtgrC(n)) + RgCm * (2 * Rti + Rto + RtgrC(n)))};$
%Начальное значение допустимого тока жилы фазы "С"

$Igdop(n) = (IgAdop(n) + IgBdop(n) + IgCdop(n)) / 3;$ %Начальное среднее значение допустимого тока для трёх фаз

%(Эти токи рассчитаны по методике ИЕС 60287. Далее их значения будут уточняться на основе измеряемых параметров в реальном времени.

$TeASum(k) = TsA; TeBSum(k) = TsB; TeCSum(k) = TsC;$ %Начальные значения суммарных температур в экранах за сутки

$kASum(k) = IeA / IgA; kBSum(k) = IeB / IgB; kCSum(k) = IeC / IgC;$ %Начальные значения суммарных коэффициентов токов в экранах

$PgASum(k)=I_gA^2 \cdot R_{gA}$; $PgBSum(k)=I_gB^2 \cdot R_{gB}$; $PgCSum(k)=I_gC^2 \cdot R_{gC}$;

%Начальные значения суммарных тепловыделений в жилах за прошлые сутки

$PeASum(k)=I_eA^2 \cdot ReA$; $PeBSum(k)=I_eB^2 \cdot ReB$; $PeCSum(k)=I_eC^2 \cdot ReC$; %Начальные

значения суммарных тепловыделений в экранах за прошлые сутки

%% 6. ЦИКЛ РАСЧЁТА МОДЕЛИ (в реальности он не должен заканчиваться, а здесь он конечен)

for t=h:h:T1

k=k+1; %Счётчик шагов

i=i+1; %Счётчик шагов за одни сутки

tt(k)=t; %Запись текущего времени в общий массив

%% 6.1. СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$I_gA=pdI_gA \cdot I_gA(k) / \sqrt{2}$; $I_gB=pdI_gB \cdot I_gB(k) / \sqrt{2}$; $I_gC=pdI_gC \cdot I_gC(k) / \sqrt{2}$; %Модули действующих значений токов в жилах

$I_eA=pdI_eA \cdot I_eA(k) / \sqrt{2}$; $I_eB=pdI_eB \cdot I_eB(k) / \sqrt{2}$; $I_eC=pdI_eC \cdot I_eC(k) / \sqrt{2}$; %Модули действующих значений токов в экранах

$T_sA=pdT_A \cdot T_{eA}(k)$; $T_sB=pdT_B \cdot T_{eB}(k)$; $T_sC=pdT_C \cdot T_{eC}(k)$; %Значения температур экранов кабелей

%% 6.2. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУР ЖИЛ НА ТЕКУЩЕМ ШАГЕ

ИНТЕГРИРОВАНИЯ

% Расчёт источников дискретной модели

$J_{c1A}=T_{gA} / (R_{c1} + i_{c1A})$; $J_{c1B}=T_{gB} / (R_{c1} + i_{c1B})$; $J_{c1C}=T_{gC} / (R_{c1} + i_{c1C})$; %Величины источников теплового потока в дискретной модели ёмкости C1, Вт/м

$J_{1A}=J_{c1A} + P_{gA}$; $J_{1B}=J_{c1B} + P_{gB}$; $J_{1C}=J_{c1C} + P_{gC}$; %Сложение источников теплового потока, параллельных ёмкости C1

$E_{c2A}=U_{c2A} + i_{c2A} \cdot R_{c2}$; $E_{c2B}=U_{c2B} + i_{c2B} \cdot R_{c2}$; $E_{c2C}=U_{c2C} + i_{c2C} \cdot R_{c2}$; %Величины источников температуры дискретных моделей ёмкости C2, К

$E_{1A}=J_{1A} \cdot R_{c1}$; $E_{1B}=J_{1B} \cdot R_{c1}$; $E_{1C}=J_{1C} \cdot R_{c1}$; %Эквивалентное преобразование источников теплового потока в источники температуры

%Расчёт модели

$f_{iA}=(E_{1A} / (R_{c1} + R_{ti}) + E_{c2A} / R_{c2} + T_{sA} / R_{ti}) / (1 / (R_{c1} + R_{ti}) + 1 / R_{c2} + 1 / R_{ti})$; %Текущий потенциал на ёмкости C2 для фазы "A", К

$fiB=(E1B./(Rc1+Rti)+Ec2B./Rc2+TsB./Rti)./(1./(Rc1+Rti)+1./Rc2+1./Rti)$; %Текущий потенциал на ёмкости C2 для фазы "B", К

$fiC=(E1C./(Rc1+Rti)+Ec2C./Rc2+TsC./Rti)./(1./(Rc1+Rti)+1./Rc2+1./Rti)$; %Текущий потенциал на ёмкости C2 для фазы "C", К

$ic1A=PgA+(fiA-E1A)./(Rc1+Rti)$; %Текущий тепловой поток на C1 для фазы "A", Вт/м

$ic1B=PgB+(fiB-E1B)./(Rc1+Rti)$; %Текущий тепловой поток на C1 для фазы "B", Вт/м

$ic1C=PgC+(fiC-E1C)./(Rc1+Rti)$; %Текущий тепловой поток на C1 для фазы "C", Вт/м

$ic2A=(fiA-Ec2A)./Rc2$; %Текущий тепловой поток на C2 для фазы "A", Вт/м

$ic2B=(fiB-Ec2B)./Rc2$; %Текущий тепловой поток на C2 для фазы "B", Вт/м

$ic2C=(fiC-Ec2C)./Rc2$; %Текущий тепловой поток на C2 для фазы "C", Вт/м

$TgA=fiA-((fiA-E1A).*Rti)./(Rc1+Rti)$; %Текущая температура жилы фазы "A", К

$TgB=fiB-((fiB-E1B).*Rti)./(Rc1+Rti)$; %Текущая температура жилы фазы "B", К

$TgC=fiC-((fiC-E1C).*Rti)./(Rc1+Rti)$; %Текущая температура жилы фазы "C", К

$TgA1(k)=TgA$; $TgB1(k)=TgB$; $TgC1(k)=TgC$; %Запись температур жил в общие массивы данных

$Uc2A=fiA$; $Uc2B=fiB$; $Uc2C=fiC$; %Потенциал на C2 для текущего шага интегрирования

%% 6.3. РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТОКА В ЭКРАНАХ,

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ В ЖИЛАХ И ЭКРАНАХ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

$kA=IeA/IgA$; $kB=IeB/IgB$; $kC=IeC/IgC$; %Предварительные значения коэффициентов токов в экранах

$x_sgA=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(TgA-20))))$;

$x_sgB=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(TgB-20))))$;

$x_sgC=sqrt(8*pi*f*k_sg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(TgC-20))))$; %Промежуточный коэффициент

$x_seA=sqrt(8*pi*f*k_se*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(TsA-20))))$;

$x_seB=sqrt(8*pi*f*k_se*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(TsB-20))))$;

$x_seC=sqrt(8*pi*f*k_se*(10^-7)/(Re_*(1+alfaCu*(TsC-20))))$; %Промежуточный коэффициент

$x_pgA=sqrt(8*pi*f*k_pg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(TgA-20))))$;

$x_pgB=sqrt(8*pi*f*k_pg*(10^-7)/(Rg_*(1+alfaCu*(TgB-20))))$;

$x_{pgC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pg} \cdot (10^{-7}) / (Rg_{*} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (TgC - 20)))}$; %Промежуточный коэффициент

$x_{peA} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (TsA - 20)))}$;

$x_{peB} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (TsB - 20)))}$;

$x_{peC} = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{pe} \cdot (10^{-7}) / (Re_{*} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (TsC - 20)))}$; %Промежуточный коэффициент

$y_{sgA} = (x_{sgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgA}^4)$; $y_{sgB} = (x_{sgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgB}^4)$;

$y_{sgC} = (x_{sgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{sgC}^4)$; %Коэффициенты поверхностного эффекта в жилах

$y_{seA} = (x_{seA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seA}^4)$; $y_{seB} = (x_{seB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seB}^4)$;

$y_{seC} = (x_{seC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{seC}^4)$; %Коэффициенты поверхностного эффекта в экранах

$y_{pgA} = (x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgA}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "А"

$y_{pgB} = (x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / D)^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / D)^2 + 1.18 / ((x_{pgB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgB}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "В"

$y_{pgC} = (x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) \cdot ((2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r1 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{pgC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{pgC}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости в жиле фазы "С"

$y_{peA} = (x_{peA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peA}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peA}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peA}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "А"

$y_{peB} = (x_{peB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peB}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / D)^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / D)^2 + 1.18 / ((x_{peB}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peB}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "В"

$y_{peC} = (x_{peC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peC}^4) \cdot ((2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2) \cdot (0.312 \cdot (2 \cdot r3 / (D \cdot \sqrt{2}))^2 + 1.18 / ((x_{peC}^4) / (192 + 0.8 \cdot x_{peC}^4) + 0.27))$; %Коэффициент эффекта близости в экране фазы "С"

$RgA = Rg_{*} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (TgA - 20)) \cdot (1 + y_{sgA} + y_{pgA})$; %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20 гр.Ц. для фазы "А", Ом/м

$RgB = Rg_{*} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (TgB - 20)) \cdot (1 + y_{sgB} + y_{pgB})$; %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20 гр.Ц. для фазы "В", Ом/м

$RgC=Rg_{-}*(1+alfaCu*(TgC-20))*(1+y_{sgC}+y_{pgC});$ %Активное сопротивление жилы переменному току при температуре 20 гр.Ц. для фазы "С", Ом/м

$ReA=Re_{-}*(1+alfaCu*(TsA-20))*(1+y_{seA}+y_{peA});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 20 гр.Ц. для фазы "А", Ом/м

$ReB=Re_{-}*(1+alfaCu*(TsB-20))*(1+y_{seB}+y_{peB});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 20 гр.Ц. для фазы "В", Ом/м

$ReC=Re_{-}*(1+alfaCu*(TsC-20))*(1+y_{seC}+y_{peC});$ %Активное сопротивление экрана переменному току при температуре 20 гр.Ц. для фазы "С", Ом/м

$PgA=IgA^2*RgA;$ $PgB=IgB^2*RgB;$ $PgC=IgC^2*RgC;$ %Тепловыделения в жилах, Вт/м

$PeA=IeA^2*ReA;$ $PeB=IeB^2*ReB;$ $PeC=IeC^2*ReC;$ %Тепловыделения в экранах, Вт/м

%% 6.4. РАСЧЁТ СУММАРНЫХ ВЕЛИЧИН

$TeASum(k)=TeASum(k-1)+TsA;$ $TeBSum(k)=TeBSum(k-1)+TsB;$ $TeCSum(k)=TeCSum(k-1)+TsC;$ %Текущие значения суммарных температур в экранах

$kASum(k)=kASum(k-1)+kA;$ $kBSum(k)=kBSum(k-1)+kB;$ $kCSum(k)=kCSum(k-1)+kC;$ %Значения суммарных коэффициентов токов в экранах

$PgASum(k)=PgASum(k-1)+PgA;$ $PgBSum(k)=PgBSum(k-1)+PgB;$ $PgCSum(k)=PgCSum(k-1)+PgC;$ %Определение средних значений тепловыделений в жилах за прошлые сутки

$PeASum(k)=PeASum(k-1)+PeA;$ $PeBSum(k)=PeBSum(k-1)+PeB;$ $PeCSum(k)=PeCSum(k-1)+PeC;$ %Определение средних значений тепловыделений в экранах за прошлые сутки

%% 6.5. РАСЧЁТ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ

if $i == m$ % (Это условие означает, что прошли одни сутки и можно вычислить средние значения контролируемых параметров, а также скорректировать значения допустимых токов в жилах)

$i=0;$ % Это нужно, чтобы ещё через сутки опять сработало предыдущее условие

$n=n+1;$ % Счётчик суток

$ttl(n)=t;$ % запись текущего времени, при котором происходит корректировка допустимых токов

%% 6.5.1. РАСЧЁТ СРЕДНИХ ВЕЛИЧИН

$TeAmid(n)=TeASum(k)/m;$ $TeVmid(n)=TeBSum(k)/m;$ $TeCmid(n)=TeCSum(k)/m;$

% Средние значения температур экранов за прошлые сутки

$kAmid(n)=kASum(k)/m;$ $kBmid(n)=kBSum(k)/m;$ $kCmid(n)=kCSum(k)/m;$ % Средние значения коэффициентов токов в экранах за прошлые сутки

$PgAmid(n)=PgASum(k)/m$; $PgBmid(n)=PgBSum(k)/m$; $PgCmid(n)=PgCSum(k)/m$;

%Средние значения тепловыделений в жилах за прошлые сутки

$PeAmid(n)=PeASum(k)/m$; $PeBmid(n)=PeBSum(k)/m$; $PeCmid(n)=PeCSum(k)/m$;

%Средние значения тепловыделений в экранах за прошлые сутки

%% 6.5.2. РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ГРУНТА

%Без учёта τ_{au} (выбрать)

$RtgrA(n)=(TeAmid(n)-T0)/(PgAmid(n)+PeAmid(n))-Rto$; %Тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от фазы "А"

$RtgrB(n)=(TeBmid(n)-T0)/(PgBmid(n)+PeBmid(n))-Rto$; %Тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от фазы "В"

$RtgrC(n)=(TeCmid(n)-T0)/(PgCmid(n)+PeCmid(n))-Rto$; %Тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от фазы "С"

%С учётом τ_{au} (выбрать)

$RtgrA(n)=(TeAmid(n)-T0)/((PgAmid(n)+PeAmid(n))*(1-\exp(-t/\tau_{auA}))-Rto$; %Тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от фазы "А"

$RtgrB(n)=(TeBmid(n)-T0)/((PgBmid(n)+PeBmid(n))*(1-\exp(-t/\tau_{auB}))-Rto$; %Тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от фазы "В"

$RtgrC(n)=(TeCmid(n)-T0)/((PgCmid(n)+PeCmid(n))*(1-\exp(-t/\tau_{auC}))-Rto$; %Тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от фазы "С"

%% 6.5.3. РАСЧЁТ ТЕКУЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ

$IgAdop(n)=\sqrt{(90-T0)/(kAmid(n)^2*ReAm*(Rto+RtgrA(n))+RgAm*(2*Rti+Rto+RtgrA(n)))}$; %Допустимый ток в жиле фазы "А"

$IgBdop(n)=\sqrt{(90-T0)/(kBmid(n)^2*ReBm*(Rto+RtgrB(n))+RgBm*(2*Rti+Rto+RtgrB(n)))}$; %Допустимый ток в жиле фазы "В"

$IgCdop(n)=\sqrt{(90-T0)/(kCmid(n)^2*ReCm*(Rto+RtgrC(n))+RgCm*(2*Rti+Rto+RtgrC(n)))}$; %Допустимый ток в жиле фазы "С"

$Igdop(n)=(IgAdop(n)+IgBdop(n)+IgCdop(n))/3$; %Среднее значение допустимого тока для трёх фаз

%% 6.5.4. ОБНУЛЕНИЕ СУММАРНЫХ ВЕЛИЧИН НА ТЕКУЩЕМ ШАГЕ k

TeASum(k)=0; TeBSum(k)=0; TeCSum(k)=0; %Сумманрые температуры экранов за
прошлые сутки

kASum(k)=0; kBSum(k)=0; kCSum(k)=0; %Сумманрые коэффициенты токов в экранах

PgASum(k)=0; PgBSum(k)=0; PgCSum(k)=0; %Сумманрые тепловыделения в жилах за
прошлые сутки

PeASum(k)=0; PeBSum(k)=0; PeCSum(k)=0; %Сумманрые тепловыделения в экранах за
прошлые сутки

end

end

%% 7. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ%

% Расчёт погрешностей

DgAComs=pdTA.TAg-TgA1;

DgBComs=pdTB.TBg-TgB1;

DgCComs=pdTC.TCg-TgC1;

% Фаза "А"

figure

hold on

plot(tt./86400,TgA1,'r--')

plot(tt./86400,pdTA.TAg,'r',tt./86400,pdTA.TAe,'b')

grid on

title('Температура жилы и экрана фазы "А"')

figure

plot(tt./86400,DgAComs,'r')

grid on

title('Погешость для фазы "А"')

% Фаза "В"

figure

hold on

plot(tt./86400,TgB1,'r--')

plot(tt./86400,pdTB.TBg,'r',tt./86400,pdTB.TBe,'b')

grid on

title('Температура жилы и экрана фазы "В"')

```
figure
plot(tt./86400,DgVComs,'r')
grid on
title('Погешость для фазы "В"')
% Фаза "С"
figure
hold on
plot(tt./86400,TgC1,'r--')
plot(tt./86400,pdTС.ТCg,'r',tt./86400,pdTС.ТCe,'b')
grid on
title('Температура жилы и экрана фазы "С"')
figure
plot(tt./86400,DgCComs,'r')
grid on
title('Погешость для фазы "С"')
%% ДОПУСТИМЫЕ ТОКИ
figure
plot(tt1./86400,RtgrA,'y',tt1./86400,RtgrB,'r',tt1./86400,RtgrC,'b')
grid on
title('Собственные сопротивления тепловому потоку в грунте')
figure
plot(tt1./86400,IgAdop,'y',tt1./86400,IgBdop,'r',tt1./86400,IgCdop,'b')
grid on
title('Допустимые токи фаз')
figure
plot(tt1./86400,Igdop,'k')
grid on
title('Средний допустимый ток')
```

Приложение П

(обязательное)

Математический алгоритм для расчёта температуры резистора в физической модели коаксиального кабеля, написанный в программе MATLAB

%% 1. ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Plcer=1985; %Плотность керамического резистора (корундовая керамика), кг/м³

r1=0.003935; %Наружный радиус резистора, м

h1=0.02845; %Высота одного резистора, м

h2=0.641; %Высота разистивного делителя, состоящего из 15 резисторов, м

r1x=sqrt(r1^2*h1*15/(h2));%Радиус эквивалентного сплошного резистора, м

Plger=930; %Плотность герметика, кг/м³

cger=1600; %Удельная теплоемкость герметика, Дж/(кг*К)

lymda_ger=0.1611; % Теплопроводность герметика, Вт/(м*К)

r2=0.055; %Наружный радиус герметика, м

r12=sqrt(r1*r2); % Промежуточный радиус герметика, м

Plst=1850; %Плотность стеклотекстолита, кг/м³

cst=995; %Удельная теплоемкость стеклотекстолита, Дж/(кг*К)

lymda_st=0.3; % Теплопроводность стеклотекстолита, Вт/(м*К)

r3=0.064; %Наружный радиус стеклотекстолита, м

Plrez=1190; %Плотность резины, кг/м³

crez=972; %Удельная теплоемкость резины, Дж/(кг*К)

lymda_rez=0.63; % Теплопроводность резины, Вт/(м*К)

alfa_rez=10.311; %Коэффициент теплоотдачи с поверхности резины, Вт/(м²*К)

r4=0.076; %Наружный радиус резины, м

h=1; %Интервал времени опроса датчиков температуры, сек.

Tos=22.35; %Температура окружающей среды, град. Цельсия

tk=21194; %Предел по времени, с

%% 2. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Rger=log(r12/r1)/(2*pi*lymda_ger); %Тепловое сопротивление одного слоя герметика, К*м/Вт

$C_{ger1} = c_{ger} * P_{lger} * \pi * (r_1^2 - r_2^2)$; %Тепловая ёмкость первого слоя герметика, Дж/(м*К)

$C_{ger2} = c_{ger} * P_{lger} * \pi * (r_2^2 - r_1^2)$; %Тепловая ёмкость второго слоя герметика, Дж/(м*К)

$pw_{ger} = 1 / (2 * \log(r_2 / r_1)) - 1 / ((r_2 / r_1)^2 - 1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для герметика, отн. ед.

$R_{st} = \log(r_3 / r_2) / (2 * \pi * \lambda_{st})$; %Тепловое сопротивление стеклотекстолита, К*м/Вт

$C_{st} = c_{st} * P_{lst} * \pi * (r_3^2 - r_2^2)$; %Тепловая ёмкость стеклотекстолита, Дж/(м*К)

$pw_{st} = 1 / (2 * \log(r_3 / r_2)) - 1 / ((r_3 / r_2)^2 - 1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для стеклотекстолита, отн. ед.

$R_{rez} = \log(r_4 / r_3) / (2 * \pi * \lambda_{rez})$; %Тепловое сопротивление резины, К*м/Вт

$C_{rez} = c_{rez} * P_{lrez} * \pi * (r_4^2 - r_3^2)$; %Тепловая ёмкость резины, Дж/(м*К)

$pw_{rez} = 1 / (2 * \log(r_4 / r_3)) - 1 / ((r_4 / r_3)^2 - 1)$; %Коэффициент Ван-Вормера для резины, отн. ед.

$R_{alfa} = 1 / (\alpha_{rez} * 2 * \pi * r_4)$; %Тепловое сопротивление поверхности резины, К*м/Вт

%Теплоёмкости схемы замещения

$C_2 = (1 - pw_{ger}) * C_{ger1} + pw_{ger} * C_{ger2}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

$C_3 = (1 - pw_{ger}) * C_{ger2} + pw_{st} * C_{st}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

$C_4 = (1 - pw_{st}) * C_{st} + pw_{rez} * C_{rez}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

$C_5 = (1 - pw_{rez}) * C_{rez}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)

%% 3. СЧИТЫВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

$Q = [0 \ 10.7 \ 12.9 \ 14.88 \ 13.38 \ 11.58] ./ h_2$; %Значения тепловыделения

$t_1 = [0 \ 103 \ 3030 \ 6761 \ 17250 \ 17596]$; %Время изменения тепловыделения

%% 4. РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

$k = 1$; $tt = 0$; $tt(k) = 0$; $T_{cer} = 0$; $T_{survGer} = 0$; $T_{surf} = 0$; $QQ = 0$; %Обнуление массивов

$i = 1$; %Номер элемента массива Q

$U_{c1} = T_{os}$; %Температура резистора в начальный момент времени

$T_{surf}(k) = T_{os}$; %Температура на поверхности резинового изолятора

$T_{survGer}(k) = T_{os}$; %Температура на поверхности герметика

$T_{cer}(k) = U_{c1}$; %Запись с общий массив данных

$U_{c2} = T_{os}$; %Потенциал на второй ёмкости в исходной схеме замещения, К

```

Uc3=Tos; %Потенциал на третьей ёмкости в исходной схеме замещения, К
Uc4=Tos; %Потенциал на четвёртой ёмкости в исходной схеме замещения, К
qc1=Q(i); %Начальный тепловой поток (ток в электричестве) в первой ёмкости, Вт/м
qc2=0; %Начальный тепловой поток (ток в электричестве) во второй ёмкости, Вт/м
qc3=0; %Начальный тепловой поток (ток в электричестве) в третьей ёмкости, Вт/м
qc4=0; %Начальный тепловой поток (ток в электричестве) в четвёртой ёмкости, Вт/м
%% ЦИКЛ ДЛЯ РАСЧЁТА ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗИСТОРА В
ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ

```

```
for t=h:h:tk-1
```

```
k=k+1; %Счётчик строчного индекса
```

%% 5. РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИЛЫ НА ОДНОМ ШАГЕ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

```
%Расчёт параметров дискретной модели тепловой схемы замещения
```

```
if t>t1(2)
```

```
    i=2;
```

```
end
```

```
if t>t1(3)
```

```
    i=3;
```

```
end
```

```
if t>t1(4)
```

```
    i=4;
```

```
end
```

```
if t>t1(5)
```

```
    i=5;
```

```
end
```

```
if t>t1(6)
```

```
    i=6;
```

```
end
```

```
QQ(k)=Q(i); %Запись в общий массив значений
```

```
ccer=0.0718*4187*(1+(5.56*10^-3)*(Uc1+273.15)-(2.61*10^-6)*(Uc1+273.15)^2);
```

```
%Удельная теплоемкость керамического резистора (корундовая керамика), Дж/(кг*К)
```

```
Ccer=ccer*Plcer*pi*r1x^2; %Тепловая ёмкость жилы, Дж/(м*К)
```

$C1 = C_{cer} + p_w_{ger} * C_{ger1}$; %Тепловая ёмкость в исходной схеме замещения, Дж/(м*К)
 $R_{c1} = h / (2 * C1)$; %Дискретное сопротивление ёмкости C1
 $Q_{c1} = U_{c1} / R_{c1} + q_{c1}$; %Величина дискретного источника теплового потока для ёмкости C1
 $R_{c2} = h / (2 * C2)$; %Дискретное сопротивление ёмкости C2
 $T_{c2} = U_{c2} + q_{c2} * R_{c2}$; %Величина дискретного источника температуры для ёмкости C2
 $R_{c3} = h / (2 * C3)$; %Дискретное сопротивление ёмкости C3
 $T_{c3} = U_{c3} + q_{c3} * R_{c3}$; %Величина дискретного источника температуры для ёмкости C3
 $R_{c4} = h / (2 * C4)$; %Дискретное сопротивление ёмкости C4
 $T_{c4} = U_{c4} + q_{c4} * R_{c4}$; %Величина дискретного источника температуры для ёмкости C4
 $Q1 = Q_{c1} + Q(i)$; %Объединение источников теплового потока
 $T1 = Q1 * R_{c1}$; %Эквивалентное преобразование источника теплового потока в источник температуры
 %Расчёт модели
 $A = [1 / (R_{c1} + R_{ger}) + 1 / R_{c2} + 1 / R_{ger} - 1 / R_{ger} \ 0;$
 $\quad -1 / R_{ger} \ 1 / R_{ger} + 1 / R_{c3} + 1 / R_{st} - 1 / R_{st};$
 $\quad 0 \ -1 / R_{st} \ 1 / R_{st} + 1 / R_{c4} + 1 / (R_{rez} + R_{alfa})]$; % Матрица коэффициентов левой части системы уравнений, составленной по методу узловых потенциалов
 $B = [T1 / (R_{c1} + R_{ger}) + T_{c2} / R_{c2}; \ T_{c3} / R_{c3}; \ T_{c4} / R_{c4} + T_{os} / (R_{rez} + R_{alfa})]$; %Матрица коэффициентов правой части системы уравнений, составленной по методу узловых потенциалов
 $f_i = A \setminus B$; %Решение системы уравнений относительно потенциалов
 $q_{c1} = Q(i) - (T1 - f_i(1)) / (R_{c1} + R_{ger})$; %Тепловой поток на C1 для текущего шага интегрирования, Вт/м
 $q_{c2} = (f_i(1) - T_{c2}) / R_{c2}$; %Тепловой поток на C2 для текущего шага интегрирования, Вт/м
 $q_{c3} = (f_i(2) - T_{c3}) / R_{c3}$; %Тепловой поток на C3 для текущего шага интегрирования, Вт/м
 $q_{c4} = (f_i(3) - T_{c4}) / R_{c4}$; %Тепловой поток на C2 для текущего шага интегрирования, Вт/м
 $U_{c1} = f_i(1) + ((T1 - f_i(1)) * R_{ger}) / (R_{c1} + R_{ger})$; %Потенциал на C1 для текущего шага интегрирования
 $U_{c2} = f_i(1)$; %Потенциал на C2 для текущего шага интегрирования
 $U_{c3} = f_i(2)$; %Потенциал на C3 для текущего шага интегрирования
 $U_{c4} = f_i(3)$; %Потенциал на C4 для текущего шага интегрирования

```

Tcer(k)=Uc1; %Запись текущего температурного потенциала на резисторе с общий
массив данных
tt(k)=t; %Запись текущего времени в массив времени для базы данных и визуализации
end
%% 6. ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ%
%Экспериментальные значения температуры на поверхности среднего резистора
T8exp = [22.35020800000000;22.35020800000000;22.36113000000000;22.35020800000000;
... 77.92708500000000;78.10523600000000;78.10523600000000;78.10523600000000;];
T8exp=T8exp';
Delta8=T8exp-Tcer; %Расчёт абсолютной погрешности
figure
plotyy(tt/3600,T8exp,tt/3600,QQ)
title('Температура центрального резистора (расчёт и эксперимент)')
hold on
plot(tt/3600,Tcer)
grid on
figure
plot(tt/3600,Delta8)
grid on
title('Абсолютная погрешность для температуры резистора')

```

Приложение Р
(обязательное)

Копия акта внедрения результатов НИР «Разработка математического алгоритма для расчёта температурных профилей жил высоковольтных кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени»



Общество с ограниченной
ответственностью
«Димрус»

614000, г. Пермь,
ул. Пермская 70, офис 403
тел./факс: (342) 212-84-74
тел.: (342) 212-91-93
E-mail: dimrus@dimrus.ru
<http://www.dimrus.ru>

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы
«Разработка математического алгоритма для расчёта температурных профилей жил высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени»

Научно-исследовательская работа (НИР) «Разработка математического алгоритма для расчёта температурных профилей жил высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени» выполнена сотрудниками ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) к.т.н., доц. Лебедевым В.Д. (руководитель НИР) и ст. преп. Зайцевым Е.С. (ответственный исполнитель).

Цель НИР заключалась в создании математического алгоритма для расчёта температурных профилей жил однофазных коаксиальных кабелей в высоковольтной кабельной линии (ВКЛ). Разработанный алгоритм позволяет определять температуру жил вдоль однофазных кабелей с необходимым пространственным разрешением в режиме реального времени. Расчёт производится на основе данных о температурных профилях металлических экранов кабелей и токовой нагрузки в жилах, периодически поступающих от средств их измерения.

В основе разработанного алгоритма лежит метод электротепловой аналогии. Тепловая схема замещения однофазного кабеля оптимизирована в целях экономии ресурсов ЭВМ и увеличения быстродействия алгоритма. Расчёт температуры в динамике производится методом неявного интегрирования (методом трапеций).

Разработанный математический алгоритм принят в ООО «Димрус» для внедрения в программное обеспечение комплексной системы мониторинга технического состояния высоковольтных кабелей 110÷500 кВ, создавая возможность контролировать фактическую пропускную способность ВКЛ в режиме реального времени.

Директор ООО «Димрус»

20 апреля 2015 г.



Ботов С.В.

Приложение С
(обязательное)

Копия акта внедрения результатов НИР «Разработка математического алгоритма для оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена»



Общество с ограниченной
ответственностью
«Димрус»

614000, г. Пермь,
ул. Пермская 70, офис 403
тел./факс: (342) 212-84-74
тел.: (342) 212-91-93
E-mail: dimrus@dimrus.ru
<http://www.dimrus.ru>

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы
«Разработка математического алгоритма для оценки пропускной способности
высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена
в режиме реального времени»

Научно-исследовательская работа (НИР) «Разработка математического алгоритма для оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени» выполнена сотрудниками ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) к.т.н., доц. Лебедевым В.Д. (руководитель НИР) и ст. преп. Зайцевым Е.С. (ответственный исполнитель).

Цель НИР заключалась в создании математического алгоритма для оценки допустимой токовой нагрузки высоковольтных кабельных линий (ВКЛ), состоящих из однофазных коаксиальных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Разработанный алгоритм позволяет определять величины допустимых токов жил однофазных кабелей в режиме реального времени в реальных условиях прокладки. Расчёт производится на основе данных о распределённой вдоль кабельной линии температуре металлических экранов и токовой нагрузки в жилах, периодически поступающих от средств их измерения.

Оценка предельной пропускной способности, определяемой максимальным током кабеля, производится с помощью методики, изложенной в ГОСТ Р МЭК 60287. Кроме того, величина теплового сопротивления грунта является расчетной величиной, и корректируется в процессе работы ВКЛ. Корректировка производится с учётом сравнения прогнозируемых и фактических температур экранов. В основе алгоритма прогнозирования температур лежит метод электротепловой аналогии. Тепловая схема замещения трёхфазной ВКЛ оптимизирована в целях экономии вычислительных ресурсов ЭВМ и увеличения быстродействия алгоритма.

Разработанный математический алгоритм принят в ООО «Димрус» для внедрения в программное обеспечение комплексной системы мониторинга технического состояния высоковольтных кабелей 110÷500 кВ, с целью контроля фактической пропускной способности ВКЛ в режиме реального времени.

Директор ООО «Димрус»

05 мая 2015 г.



Ботов С.В.

Приложение Т

(обязательное)

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчёта температурного профиля жилы однофазного коаксиального силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015618278

Программа для расчёта температурного профиля жилы однофазного коаксиального силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Лебедев Владимир Дмитриевич (RU),
Зайцев Евгений Сергеевич (RU)*

Заявка № 2015614873

Дата поступления 08 июня 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 августа 2015 г.



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Handwritten signature of L.L. Kiriy in blue ink.

Л.Л. Кирий

Приложение У
(обязательное)

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчёта температуры жил и оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016616260

Программа для расчёта температуры жил и оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Лебедев Владимир Дмитриевич (RU),
Зайцев Евгений Сергеевич (RU)*

Заявка № **2016613614**

Дата поступления **13 апреля 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2016 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

