

Направление подготовки: 140400 Электроэнергетика и электротехника

Профиль подготовки: Электрический транспорт

Квалификация (степень) выпускника: магистр

Форма обучения: очная

Дисциплина: "Электрооборудование и системы управления электроподвижным составом"

Комаров В.Г.

Лекция 7

19.05.2026 г.

## Тема: Тепловые процессы в тяговом электрооборудовании и их моделирование

Потери энергии, возникающие при работе электрооборудования, в конечном счёте всегда превращаются в тепло и приводят к его нагреванию. Тепловая энергия накапливается в материалах (веществе) за счёт их теплоёмкости. Накопленная тепловая энергия передаётся в окружающую среду за счёт теплоотдачи. Теплоотдача происходит тремя путями:

- кондукцией (теплопроводностью);
- конвекцией (омыванием жидкостью или газом);
- излучением (электромагнитных волн).

### Кондукция

Количество тепла в Джоулях, отдаваемого кондукцией (теплопроводностью) определяется уравнением Фурье

$$Q_T = \sigma \cdot \Theta \cdot \Delta t \quad , (1)$$

где  $\sigma = \frac{1}{R_T}$  - теплопроводность, величина обратная тепловому сопротивлению, Вт/°С;

$\theta$  — разность температур тела и среды  $\Theta = T_T - T_c$  , °С;

$\Delta t$  — интервал времени теплового процесса, с.

Как правило, передача тепла кондукцией происходит через многослойную структуру конструкции. Тепловое сопротивление при этом определяется суммарным тепловым сопротивлением звеньев такой структуры

$$R_T = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot S} \quad , (2)$$

где  $\delta_i$  — толщина материала  $i$ -го элемента конструкции, м;

$\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности  $i$ -го элемента конструкции, Вт/м·°С;

$S$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Для большинства металлов  $\lambda$  практически линейно зависит от температуры. Так для меди  $\lambda=396$  Вт/(м·°C), а для алюминия  $\lambda=210$  Вт/(м·°C).

## Конвекция

Конвекция представляет собой передачу тепла посредством движения омывающих тело масс вещества (жидкости или газа) из области одной температуры в область другой температуры. Конвекция может быть как естественной, так и принудительной, например, с помощью насоса или вентилятора. Количество тепла, передаваемого конвекцией, определяется формулой Ньютона

$$Q_K = \alpha_K \cdot \Theta \cdot S \cdot \Delta t \quad ,$$

где  $\alpha_K$  — коэффициент теплопередачи конвекцией;

$S$  — площадь теплоотдающей поверхности;

$\theta$  — разность температур тела и окружающей среды.

## Излучение

Излучение представляет собой перенос тепла электромагнитными волнами и описывается уравнением (законом) Стефана-Больцмана

$$Q_{II} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_C}{100} \right)^4 \right] \cdot S \cdot \Delta t \quad , (4)$$

где  $T_T$  и  $T_C$  - соответственно температура теплоотдающей поверхности и окружающей среды, °K;

$\varepsilon$  — коэффициент, определяемый степенью черноты поверхности излучения;

$C_0$  — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, равный 5,67 Вт/(м<sup>2</sup>·°K<sup>4</sup>).

Коэффициент  $\varepsilon$  зависит также от шероховатости поверхности излучения. Так для полированной поверхности он почти в 2 раза ниже, чем для необработанной.

## Тепловые процессы в тяговых электрических машинах

Тяговую электрическую машину в первом приближении можно условно рассматривать, как единое тело, обладающее некоторой результирующей теплоёмкостью  $C$ , Дж/град, внутренним источником тепла, мощность которого равна суммарной мощности потерь энергии в машине  $\Delta P$ , Вт и суммарной теплоотдачей во внешнюю (окружающую) среду  $A$ , Вт/град. В этом случае тепловой процесс описывается дифференциальным уравнением

$$C \cdot \frac{d\Theta}{dt} + A \cdot \Theta = \Delta P \quad , (5)$$

где  $\theta$  — превышение температуры тяговой машины над окружающей средой, °C.

Теплоотдача является при этом мощностью отдаваемого в окружающую среду теплового потока через кондукцию, конвекцию и излучение

$$A = \frac{Q_T + Q_K + Q_{II}}{\Delta t} \quad , (6)$$

где  $\Delta t$  - интервал времени протекания процессов в тяговой машине.

Для тяговых электрических машин большую роль в охлаждении играет принудительная воздушная или жидкостная конвекция.

Разделив обе части уравнения (5) на теплоотдачу  $A$ , получаем обобщённое уравнение теплового процесса

$$\tau \cdot \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \frac{\Delta P}{A}, \quad (7)$$

где  $\tau = C/A$  — постоянная нагревания тяговой машины, с.

В установившемся режиме при  $\theta = \theta_{\infty}$   $\frac{d\Theta}{dt} = 0$  из уравнения (5) следует

$$A \cdot \Theta_{\infty} = \Delta P_{\infty},$$

откуда

$$A = \frac{\Delta P_{\infty}}{\Theta_{\infty}}. \quad (8).$$

Исходя из этого обобщённое уравнение (7) можно переписать в виде

$$\tau \cdot \frac{d\dot{\Theta}}{dt} + \dot{\Theta} = \Delta \dot{P}, \quad (9)$$

где  $\dot{\Theta} = \frac{\Theta}{\Theta_{\infty}}$  — относительное превышение температуры,

$$\Delta \dot{P} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\infty}} - \text{относительная мощность потерь в тяговой машине.}$$

Уравнение (9) имеет решение в общем виде

$$\dot{\Theta} = \Delta \dot{P} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] + \dot{\Theta}_0 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau}), \quad (10)$$

где  $\dot{\Theta}_0$  — начальное относительное значение превышения температуры.

Для часового режима уравнение (10) можно переписать в виде

$$\dot{\Theta}_u = \Delta \dot{P}_u [1 - \exp(-\frac{3600}{\tau})],$$

откуда можно получить

$$\tau = \frac{3600}{\ln\left(\frac{\Delta \dot{P}_u}{\Delta \dot{P}_u - \dot{\Theta}_u}\right)}, \text{ с.}$$

Учитывая, что  $\dot{\Theta}_u = \frac{\Theta_u}{\Theta_{\infty}} = 1$  и  $\Delta \dot{P}_u = \frac{\Delta P_u}{\Delta P_{\infty}}$ , полученное выражение можно переписать в

виде

$$\tau = \frac{3600}{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta P_{\infty}}{\Delta P_u}}\right)}, \text{ с.}$$

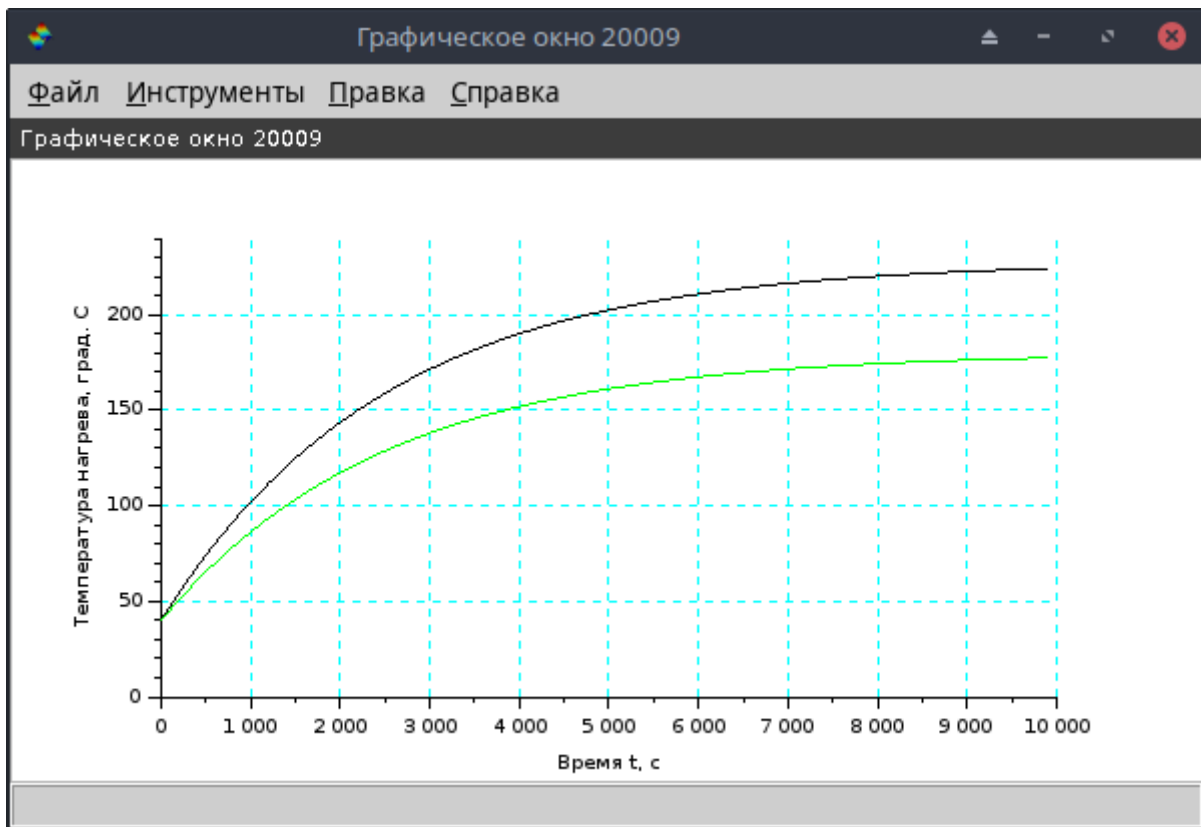


Рис. 1. Нагревание тяговой машины ДК117А с изоляцией класса Н (180°C) в часовом (чёрная кривая) и длительном (зелёная кривая) режимах

Таким образом по отношению величин мощности потерь в часовом и длительном режиме, которые можно получить из справочных материалов, можно получить приближённое значение постоянной нагревания тяговой машины. Обычно в справочных материалах приводятся значения кпд длительного  $\eta_{\infty}$  и часового  $\eta_{\text{ч}}$  режимов. Тогда соотношение потерь может быть вычислено по формуле

$$\frac{\Delta P_{\infty}}{\Delta P_{\text{ч}}} = \frac{(1 - \eta_{\infty}) \cdot P_{\infty}}{(1 - \eta_{\text{ч}}) \cdot P_{\text{ч}}},$$

где  $P_{\infty}$  и  $P_{\text{ч}}$  — мощность тяговой машины в длительном и часовом режимах, соответственно.

### Блок-схема тепловой модели тяговой машины

Входной величиной является реализуемая мощность в тяговом или тормозном режиме, а выходной является температура нагревания критического узла тяговой машины. Таковым обычно является обмотка якоря. Блок-схему модели строим в соответствии с уравнением (9).

В общем случае кпд  $\eta$  является функцией тока якоря  $I_a$ , тока возбуждения  $I_f$  и скорости движения  $V$  или частоты вращения вала  $n$ , а теплоотдача  $A$  зависит от превышения температуры  $\theta$  и скорости движения  $V$  или частоты вращения вала  $n$ . Блок-схема этого процесса приведена на рис. 2.

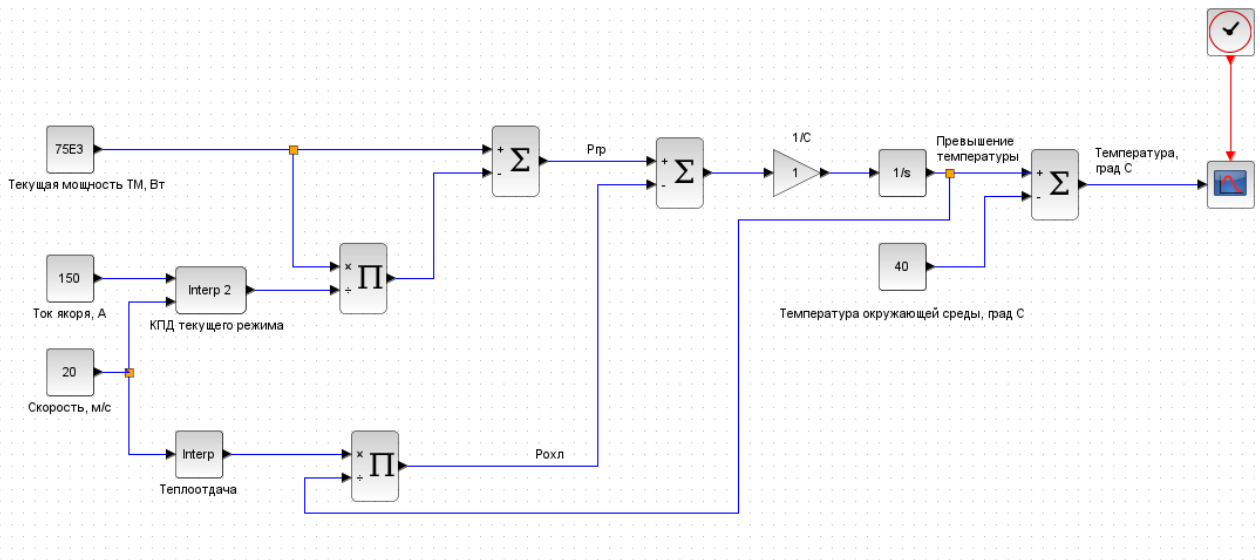


Рис. 2.

Но мы в первом приближении будем считать уравнение (9) с постоянными коэффициентами. Тогда упрощённая блок-схема обобщённой модели для часового режима будет иметь вид, представленный на рис. 3.

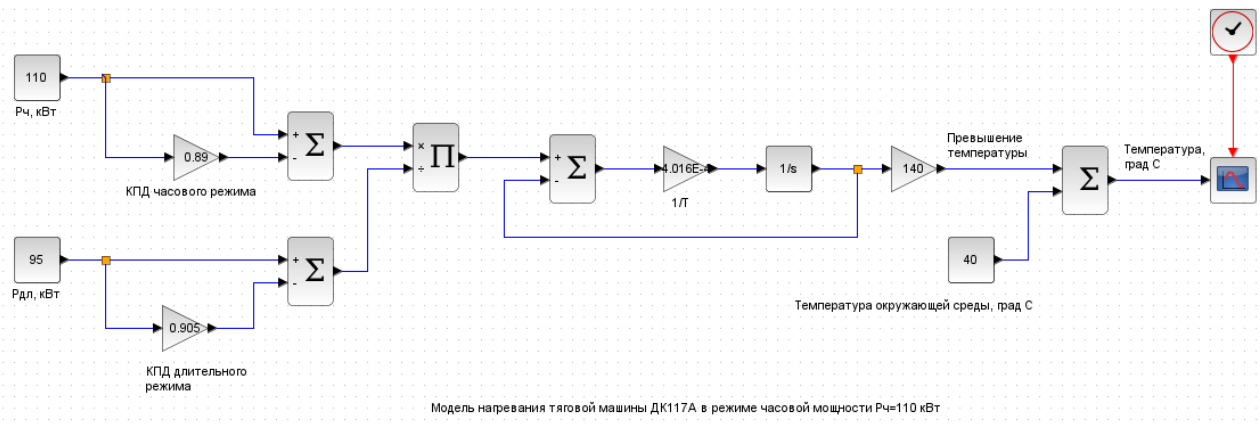


Рис. 3.

Результаты моделирования приведены на рис. 4.

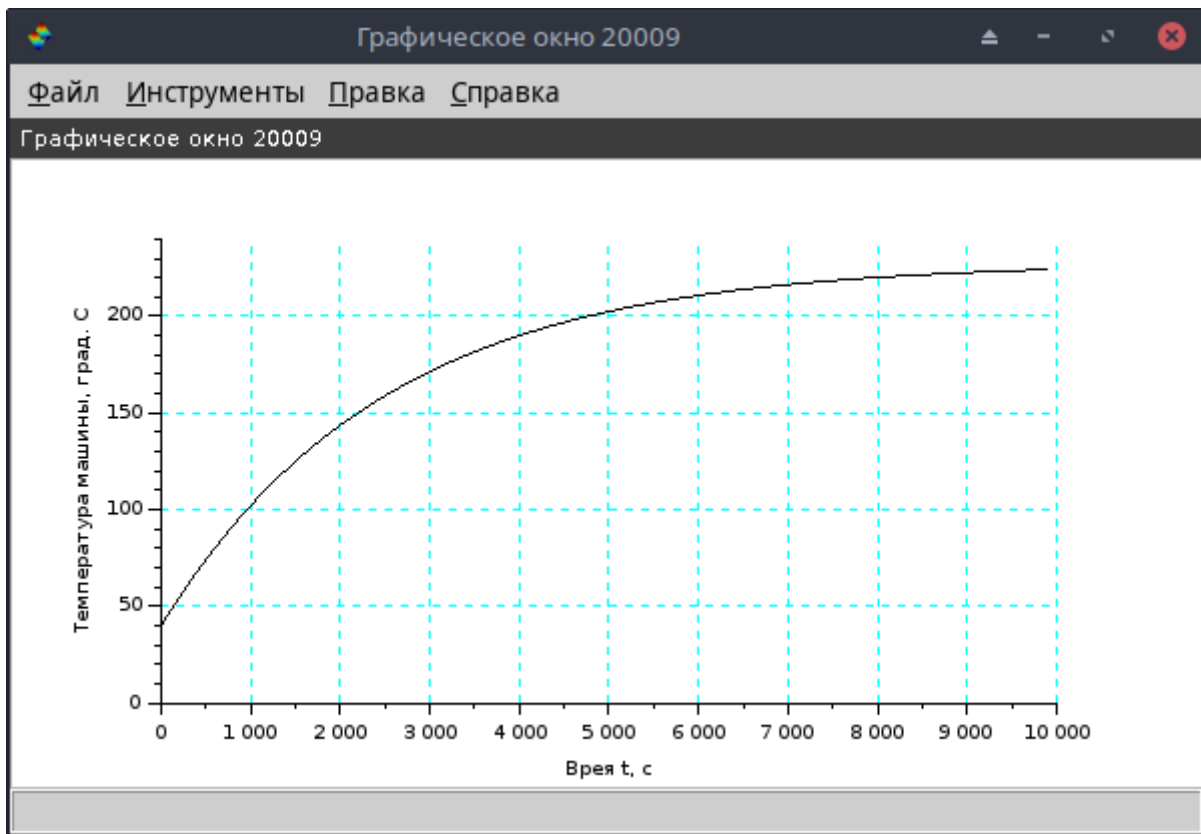


Рис. 4. Результаты моделирования нагревания тяговой машины ДК117А в часовом режиме

Как видно из диаграммы (Рис. 4) предельная температура для используемого класса изоляции Н (180°C) достигается через 3600 с, т. е. через час. Значит модель адекватно отображает процесс нагревания тяговой машины.

## Тепловая цепь тяговой асинхронной машины

Для более точного моделирования тепловых процессов в тяговой электрической машине и её элементах необходимо учитывать её внутреннюю структуру. Точное решение задачи определения теплового состояния электрической машины возможно с применением численных методов расчета трехмерных тепловых полей на основе 3D-модели. Однако на практике тепловые расчеты машин выполняются чаще всего с помощью тепловых цепей, построенных на основе выявленных выше аналогий с электрическими цепями.

Рассмотрим построение тепловой цепи замещения тяговой асинхронной машины защищенного исполнения.

Для составления тепловой цепи всю тепловую систему машины с непрерывно распределенными тепловыми источниками и тепловыми параметрами заменяют эквивалентной схемой, составленной из тепловых сопротивлений и источников теплотерь.

Статор машины в тепловом отношении можно разбить на три условно однородные части, являющиеся источником тепла:

- пазовую часть обмотки статора с источниками теплотерь  $P_{11}$ ;

- лобовые части обмотки статора с источниками теплотерь  $P_{21}$ ;
- стальной сердечник с потерями  $P_{31}$ .

В роторе машины в номинальном режиме есть два источника тепла:

- пазовая часть обмотки ротора с источниками теплотерь  $P_{12}$ ;
- лобовые части обмотки ротора с источниками теплотерь  $P_{22}$ .

Принимаем следующие пути рассеяния тепловых потоков:

- 1) тепловой поток  $Q_{nc1}$  от пазовой части обмотки статора к стенкам зубцов и ярму сердечника статора через пазовую изоляцию с тепловым сопротивлением  $R_{11}$ .
- 2) тепловой поток  $Q_{nl1}$  от пазовых частей обмотки статора к лобовым частям вдоль проводников с тепловым сопротивлением  $R_{21}$ .
- 3) тепловой поток  $Q_{lb1}$  от лобовых частей обмотки статора к охлаждающему воздуху через тепловое сопротивление  $R_{31}$ .
- 4) тепловой поток  $Q_{ce1}$  с торцевой поверхности сердечника статора к охлаждающему воздуху через тепловое сопротивление  $R_{41}$ .
- 5) тепловой поток  $Q_{cs1}$  с поверхности сердечника статора к воздуху зазора через тепловое сопротивление  $R_{51}$ .
- 6) тепловой поток  $Q_{ck}$  с поверхности статора к корпусу через тепловое сопротивление  $R_{61}$ .
- 7) тепловой поток  $Q_{nc2}$  от пазовой части обмотки ротора к стенкам зубцов и ярму сердечника ротора через пазовую изоляцию с тепловым сопротивлением  $R_{12}$ .
- 8) тепловой поток  $Q_{nl2}$  от пазовых частей обмотки ротора к лобовым частям вдоль проводников с тепловым сопротивлением  $R_{22}$ .
- 9) тепловой поток  $Q_{lb2}$  от лобовых частей обмотки к охлаждающему воздуху через тепловое сопротивление  $R_{32}$ .
- 10) тепловой поток  $Q_{ce2}$  с торцевой поверхности сердечника ротора к охлаждающему воздуху через тепловое сопротивление  $R_{42}$ .
- 11) тепловой поток  $Q_{cs2}$  с поверхности сердечника ротора к воздуху зазора через тепловое сопротивление  $R_{52}$ .
- 12) тепловой поток  $Q_{ek}$  от воздуха внутри машины к корпусу через тепловое сопротивление  $R_{62}$ .
- 13) тепловой поток  $Q_{kv}$  с поверхности корпуса к охлаждающему воздуху за пределами машины через тепловое сопротивление  $R_k$ .

Полученная таким образом тепловая цепь тяговой асинхронной машины представлена на рис. 5.

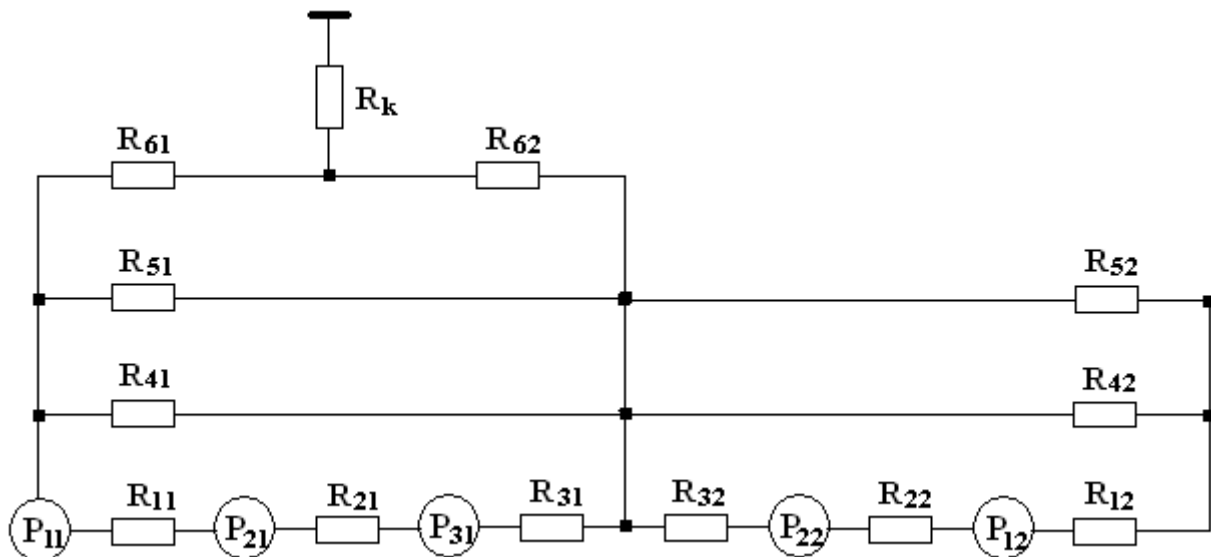


Рис. 5. Тепловая цепь тяговой асинхронной машины.

Нагрев каждого элемента тепловой цепи происходит с определенной инерцией. За инертность процессов в тепловой цепи отвечает теплоёмкость. Теплоёмкости отдельных элементов тепловой цепи определяются по удельной теплоёмкости материала элемента и его массе.

Правила построения подобной электрической схемы на основе тепловой:

1. Тепловые сопротивления заменяются электрическими без какого-либо изменения топологии схемы.
2. На месте источника теплового потока в эквивалентной электрической цепи ставится узел, в который входит ветвь от эквивалентного источника тока. При этом свободный вывод источника тока заземляется.

На основе вышесказанного строится электрическая схема замещения тепловой цепи статора асинхронной тяговой машины (рис 6). В целях упрощения модели величины сопротивлений и емкостей в схеме на рис. 6 можно выбрать равными соответствующим величинам тепловых сопротивлений и теплоемкостей, то есть масштабы  $m_c = m_R = 1$ .

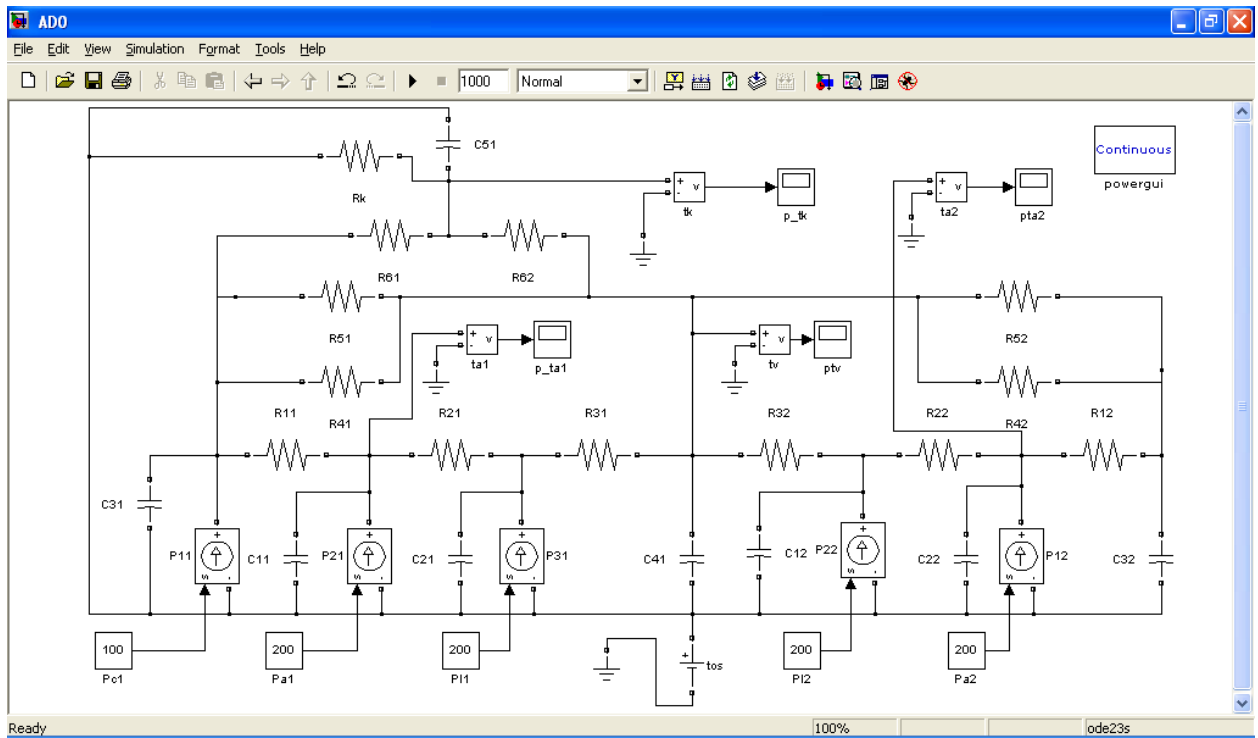


Рис. 6. Электрическая схема замещения тепловой цепи статора тяговой асинхронной машины в среде Simulink