

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
в г. Смоленске

# Магистерская диссертация

Современные методы исследования  
динамических режимов работы асинхронных  
двигателей

Выполнил: Сафоненков А. А.  
Научный руководитель: к.т.н. Максимкин В. Л.

# Актуальность темы

Применение современных математических пакетов позволит более точно и рационально рассчитать двигатель для динамических режимов работы, не прибегая к помощи эксперимента.

# Цель работы

Анализ новых методов и технологий,  
применяемых для исследования АД.

В качестве объекта исследования в работе  
выбран АД.

# Задачи

- Рассмотреть различные методы исследования динамических режимов работы;
- Рассмотреть различные виды нагрузок электрических машин и способы их математического описания;
- Рассмотреть существующие математические модели электромеханических и тепловых процессов для исследования АД, используя различные современные математические пакеты;
- Выполнить анализ рассмотренных математических моделей и сравнить их.

# Научная новизна

- Продемонстрирована возможность использования новых технологий для решения задач электромеханики;
- Была адаптирована программа исследования АД в динамическом режиме работы, для поставленной задачи;
- Проведено сравнение рассмотренных методов моделирования переходных процессов.

# Методы исследования динамических режимов работы АД:

- Экспериментальный;
- Метод математического моделирования;
- Исследование с помощью нейронных сетей.

# Унифицированное представление случайного стационарного процесса:

$$M_c(t) = \langle M_c \rangle + \mu_1 \cdot \cos(\mu_2 t + \mu_3)$$

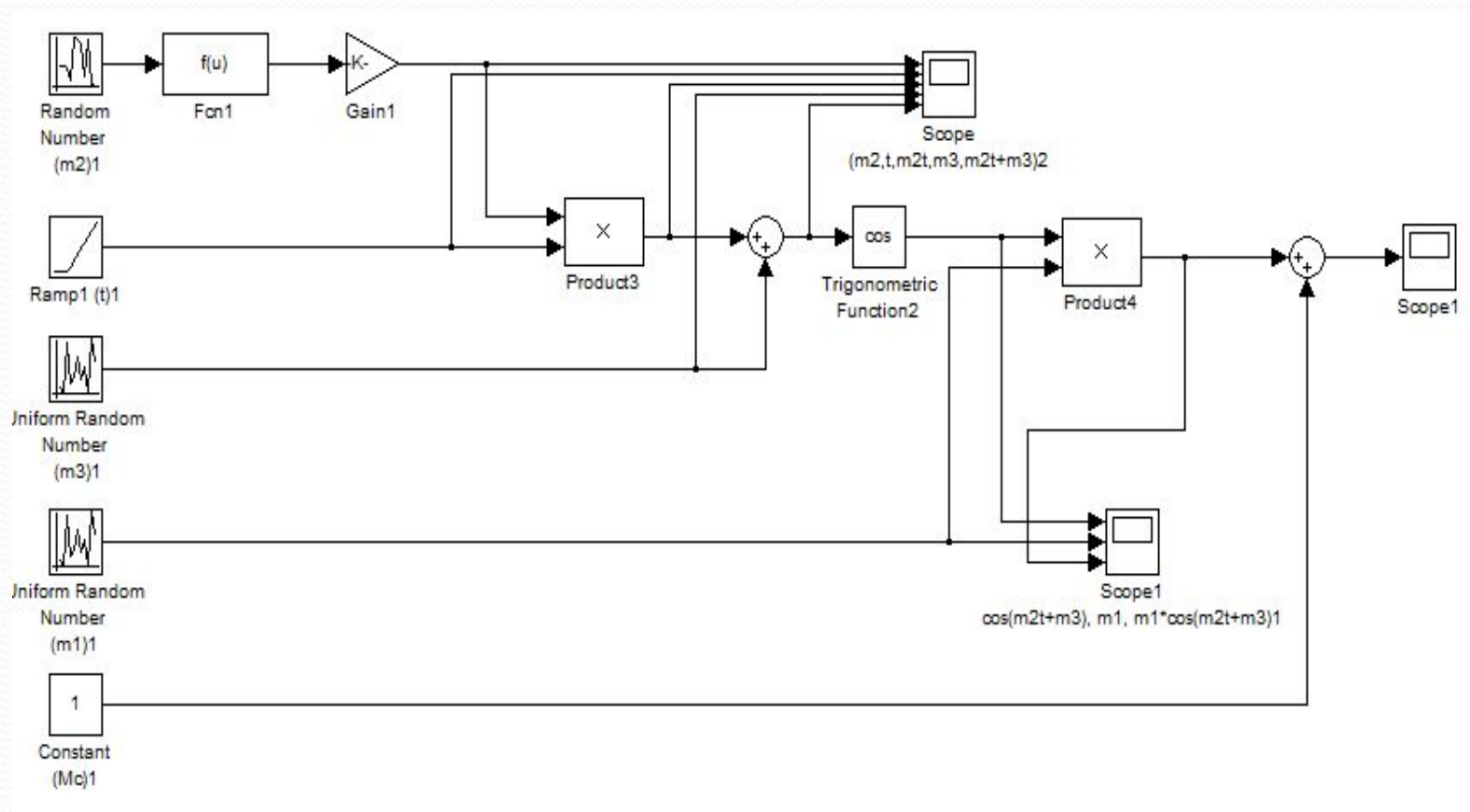
$\langle M_c \rangle$  – математическое ожидание (МО) случайного процесса;

$\mu_3$  – случайная фаза, представляющая собой равномерно распределенное на интервале  $(0, 2\pi)$  случайное число.

Закон распределения случайной величины  $\mu_2$  зависит от вида корреляционной функции  $M_c(t)$ .

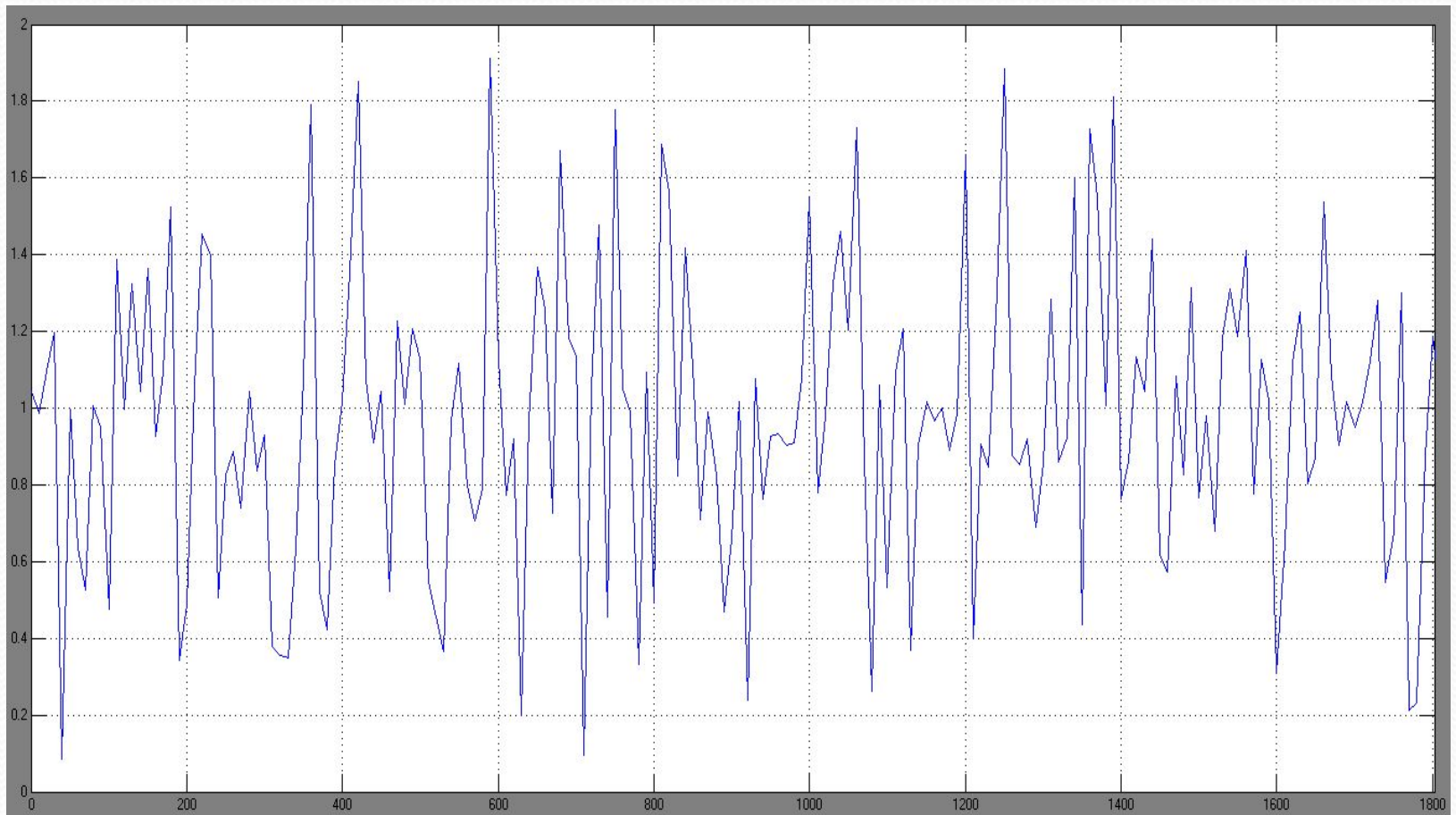
Закон распределения  $\mu_1$  произвольный.

# Подпрограмма генерации случайного момента нагружения





# Реализация случайной функции момента сопротивления



# Исследование динамических режимов работы АД

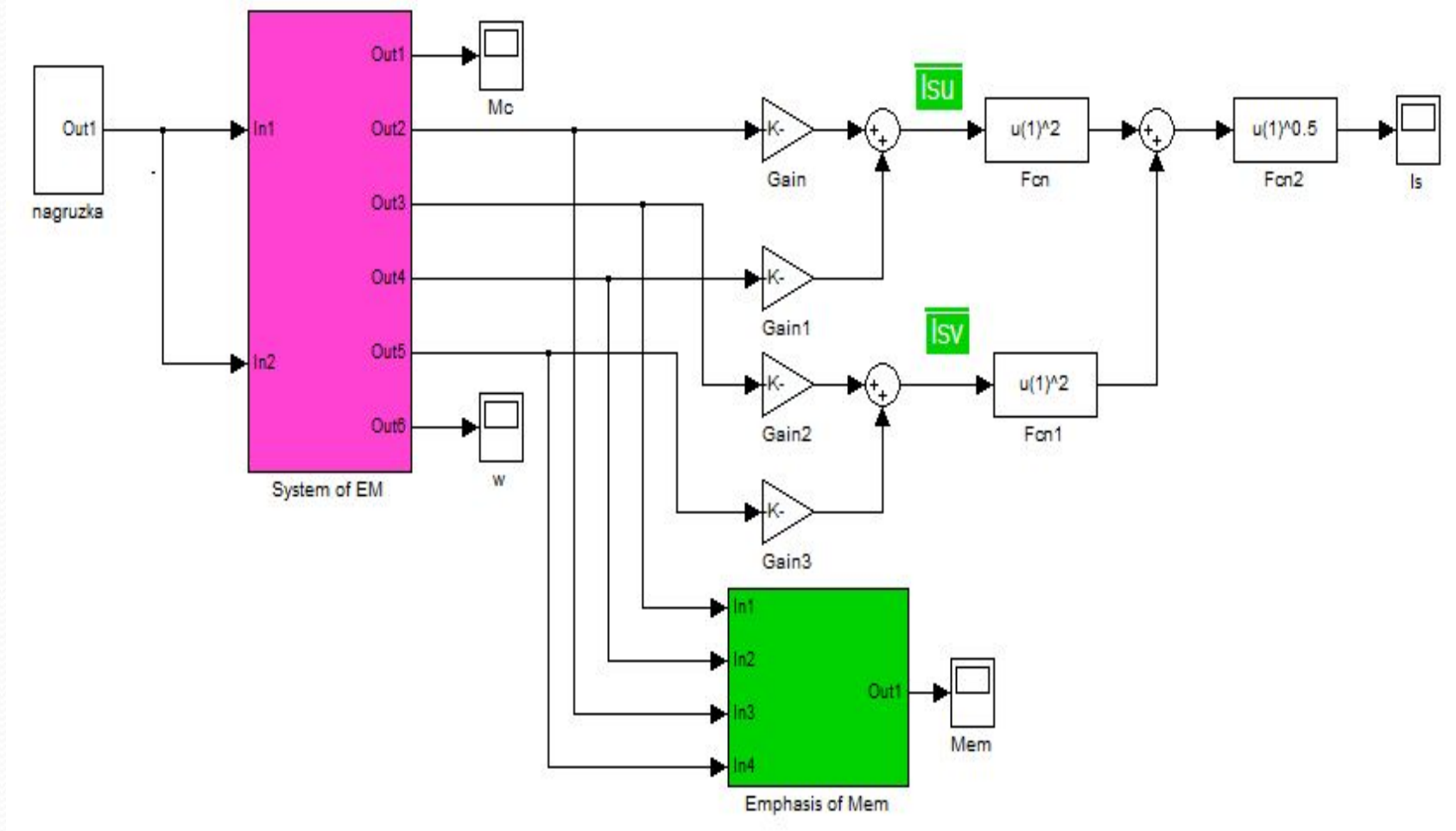
Переходным или динамическим режимом работы электрической машины называется режим работы при переходе из одного установившегося состояния к другому, происходящему во время пуска, торможения, реверсирования и резкого приложения нагрузки на валу. Эти режимы характеризуются изменениями ЭДС, угловой скорости, момента и тока, а вследствие этого и температуры нагрева электрической машины.

# Модель обобщённой несимметричной ЭМ в координатах $u, v$

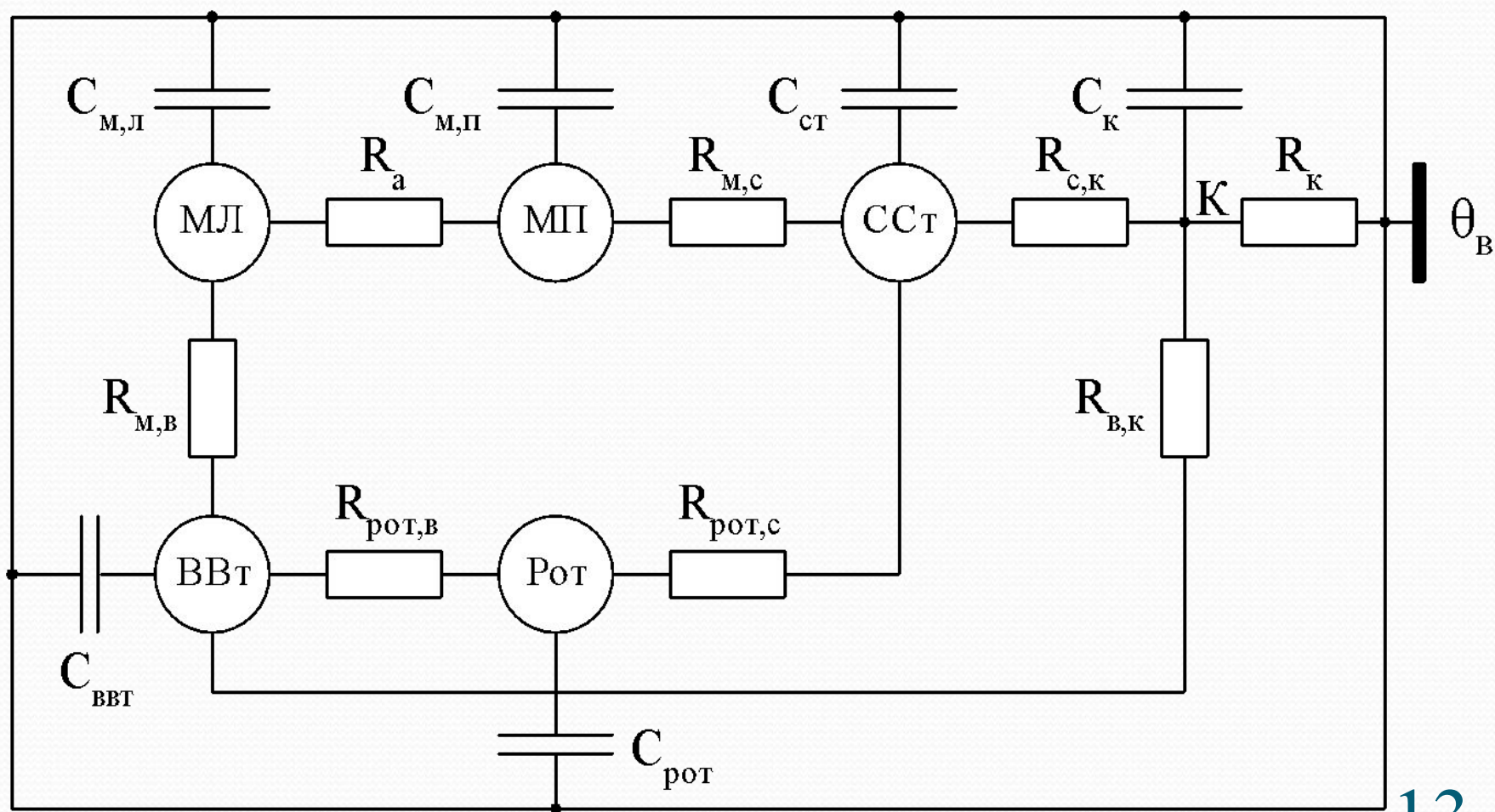
Система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = i_s \cdot R_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = i_r \cdot R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega)\Psi_r \\ \omega_1 \Psi_s = x_s i_s + x_m i_r \\ \omega_1 \Psi_r = x_r i_r + x_m i_s \\ M_{\text{ЭМ}} = \frac{mp}{2\omega_1} \cdot x_m \cdot \text{Re}[j i_s^* i_r] \\ M_{\text{ЭМ}} - M_c = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \end{array} \right.$$

# Подпрограмма электромагнитного расчёта



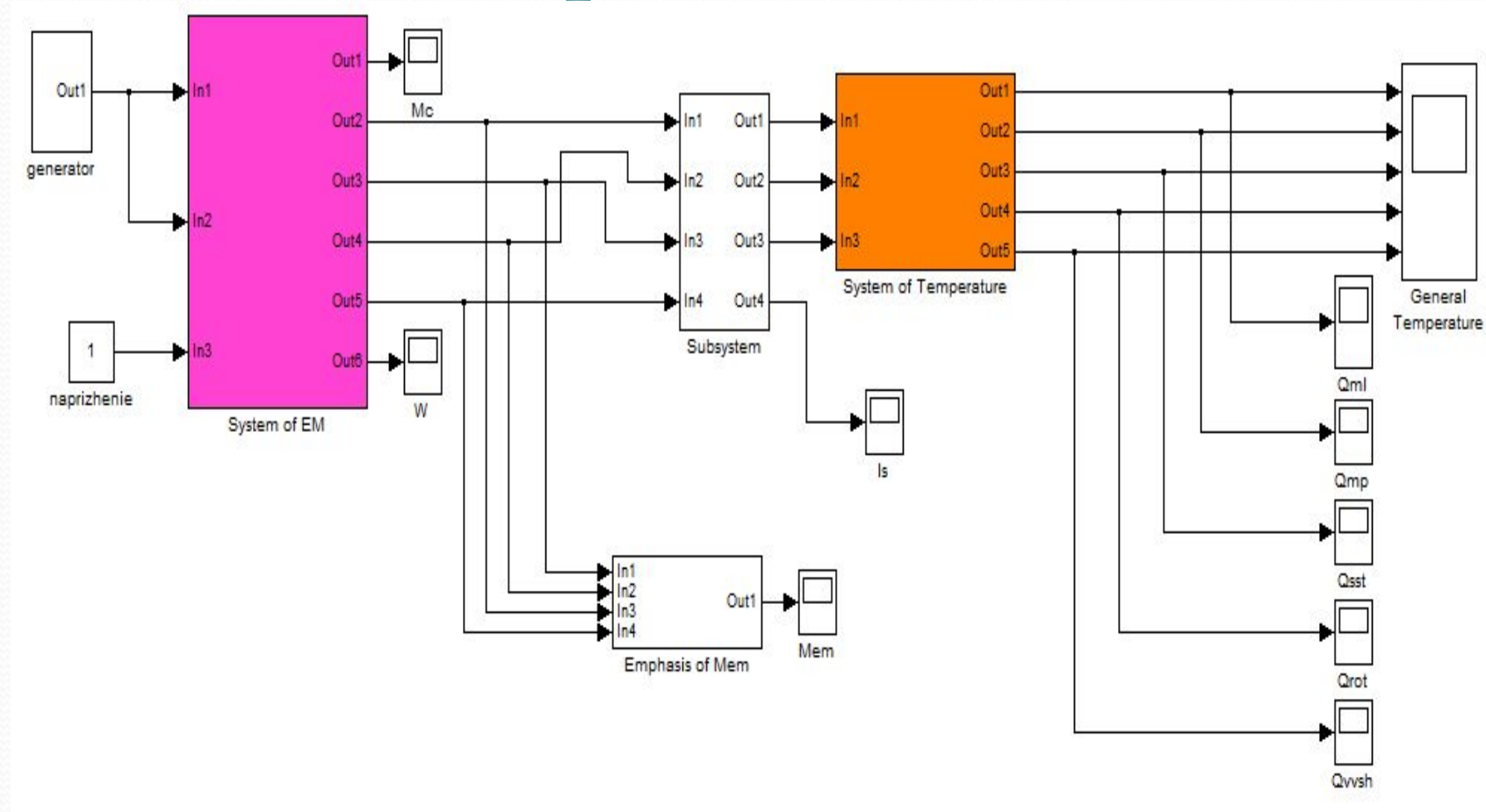
# Эквивалентная тепловая схема АД для расчёта нестационарных процессов



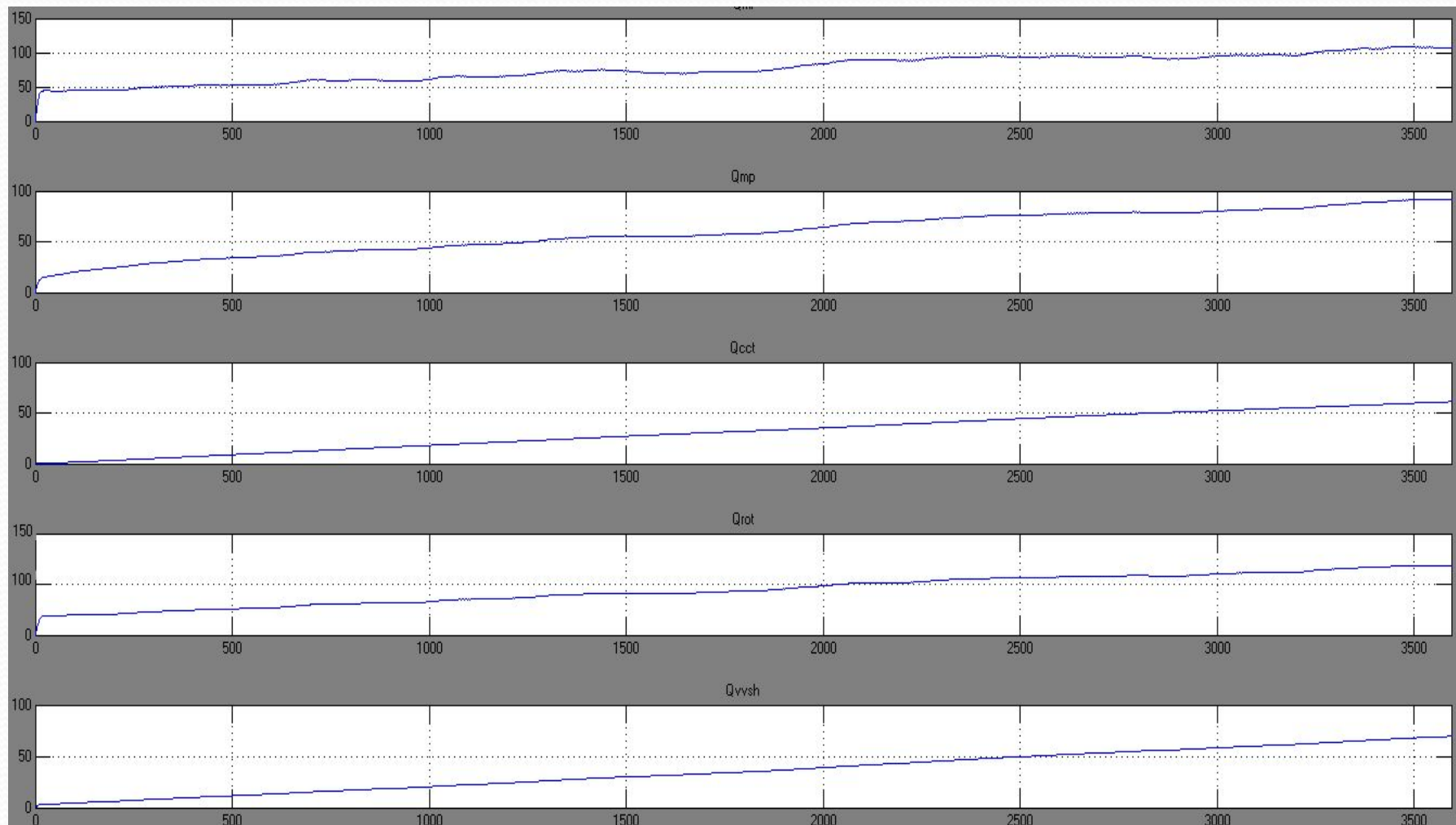
# Система Дифференциальных уравнений описывающих тепловое состояние АД:

$$\left\{ \begin{aligned}
 C_{M,л} \frac{d\Theta_{M,л}}{dt} &= -(\lambda_a + \lambda_{M,в})\Theta_{M,л} + \Theta_{M,n}\lambda_a + \Theta_{B,в}\lambda_{M,в} + P_{M,л} \\
 C_{M,n} \frac{d\Theta_{M,n}}{dt} &= -(\lambda_a + \lambda_{M,в})\Theta_{M,n} + \Theta_{M,л}\lambda_a + \Theta_{c,см}\lambda_{M,c} + P_{M,л} \\
 (C_{c,см} + C_{стан}) \frac{d\Theta_{c,см}}{dt} &= -\left(\lambda_{M,c} + \lambda_{рот,c} + \lambda_{c,в} + \frac{\lambda_c + \lambda'_c}{\sum \lambda} \lambda_{c,c}\right)\Theta_{c,см} + \Theta_{M,n}\lambda_{M,c} + \\
 &\quad + \Theta_{рот}\lambda_{рот,c} + \Theta_{B,в}\left(\lambda_{c,в} + \frac{\lambda_c}{\sum \lambda} \lambda_{c,c}\right) + \lambda_{рот,в} \\
 (C_{обм,рот} + C_{a,рот}) \frac{d\Theta_{рот}}{dt} &= -(\lambda_{рот,c} + \lambda_{рот,в})\Theta_{рот} + \Theta_{c,см}\lambda_{рот,c} + \Theta_{рот}\lambda_{рот,c} + \\
 &\quad + \Theta_{B,в}\lambda_{рот,в} + P_{рот} \\
 C_{B,в} \frac{d\Theta_{B,в}}{dt} &= -\left(\lambda_{M,в} + \lambda_{c,в} + \lambda_{рот,в} + \frac{\lambda_c + \lambda'_c}{\sum \lambda} \lambda_c\right)\Theta_{B,в} + \Theta_{M,л}\lambda_{M,в} + \Theta_{рот}\lambda_{M,в} + \\
 &\quad + \Theta_{c,см}\left(\lambda_{c,в} + \frac{\lambda_{c,c}}{\sum \lambda} \lambda_c\right) + P_{мех}
 \end{aligned} \right.$$

# Подпрограмма теплового расчёта

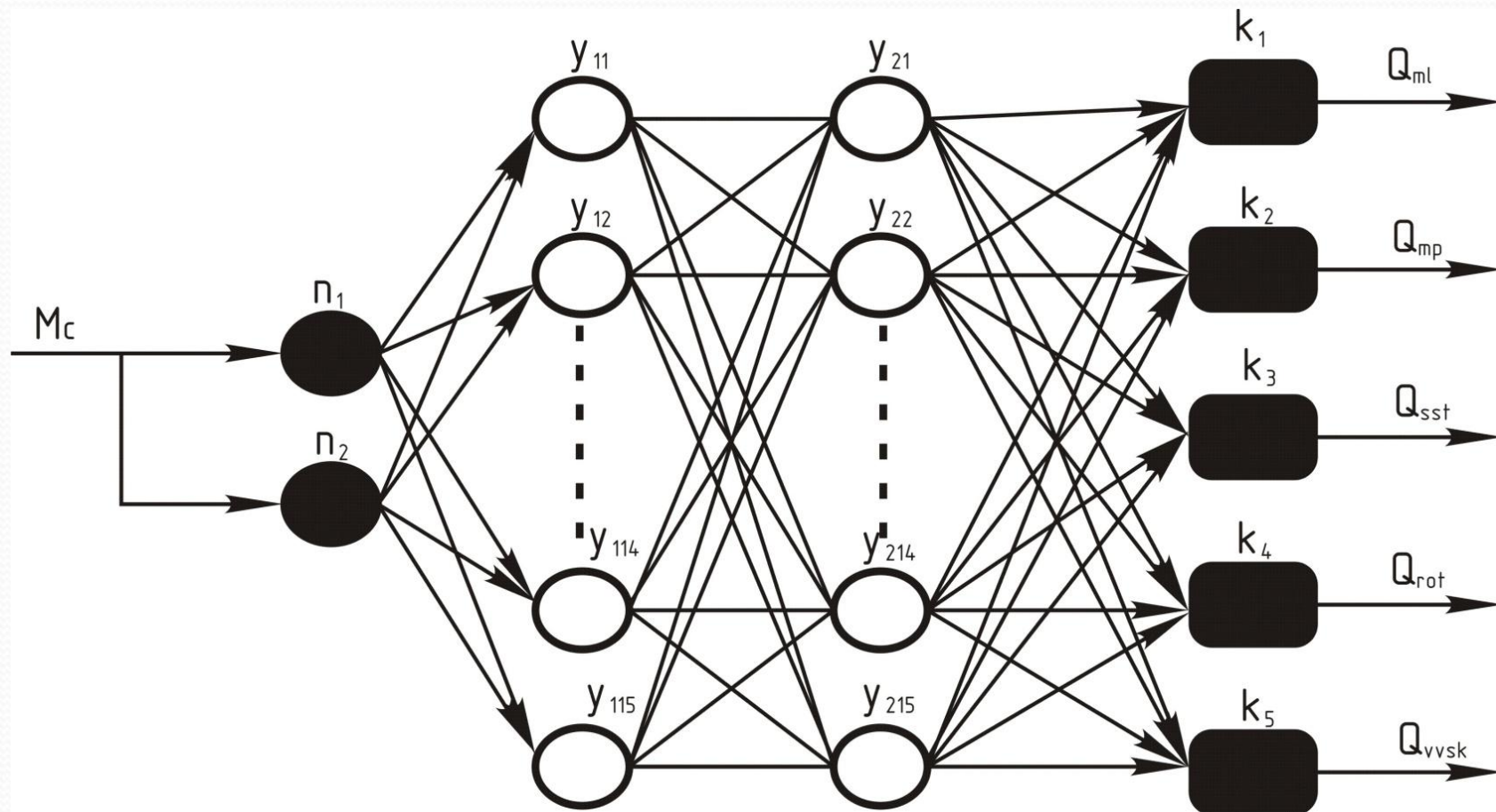


# Графики температур

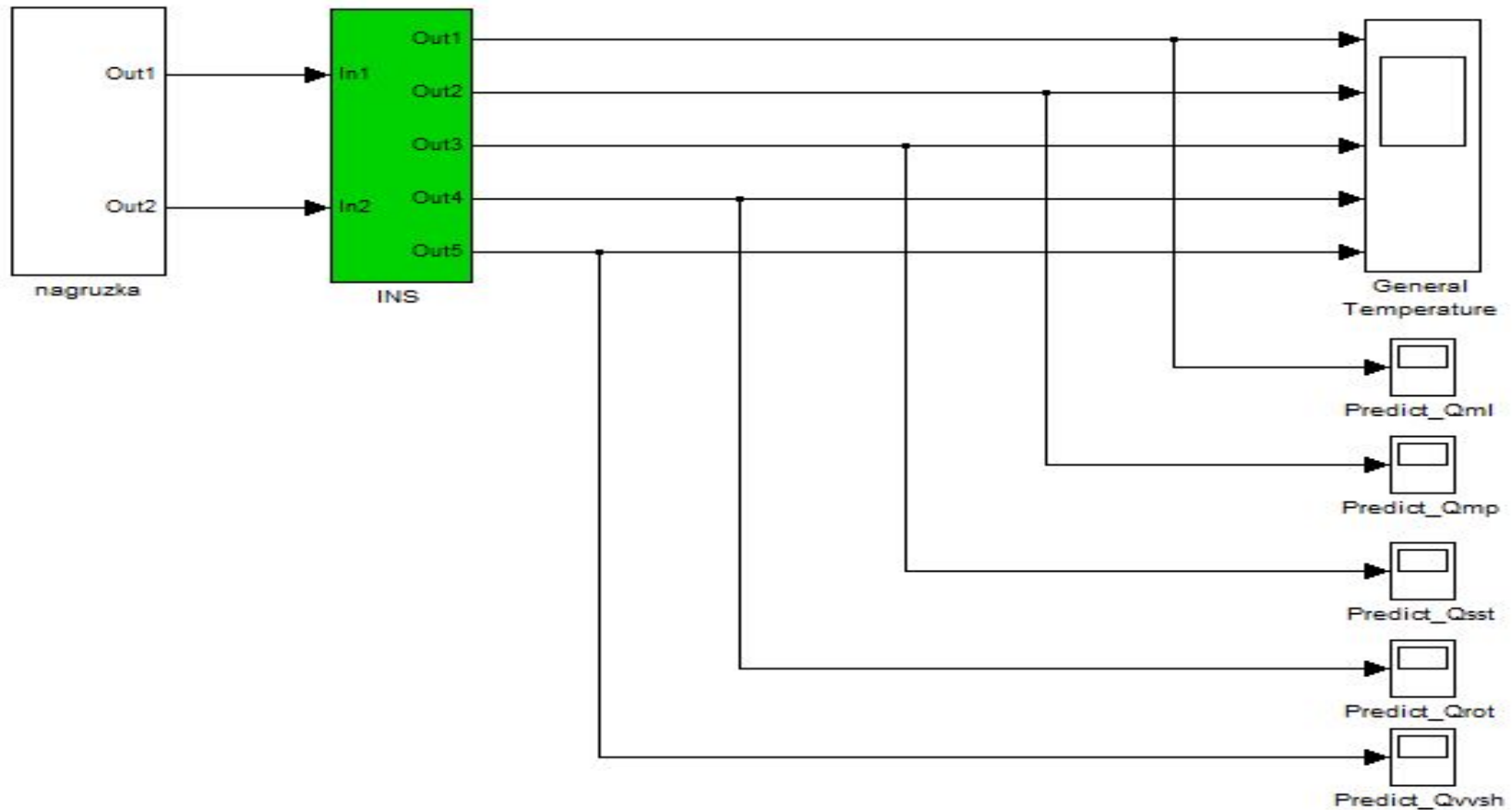




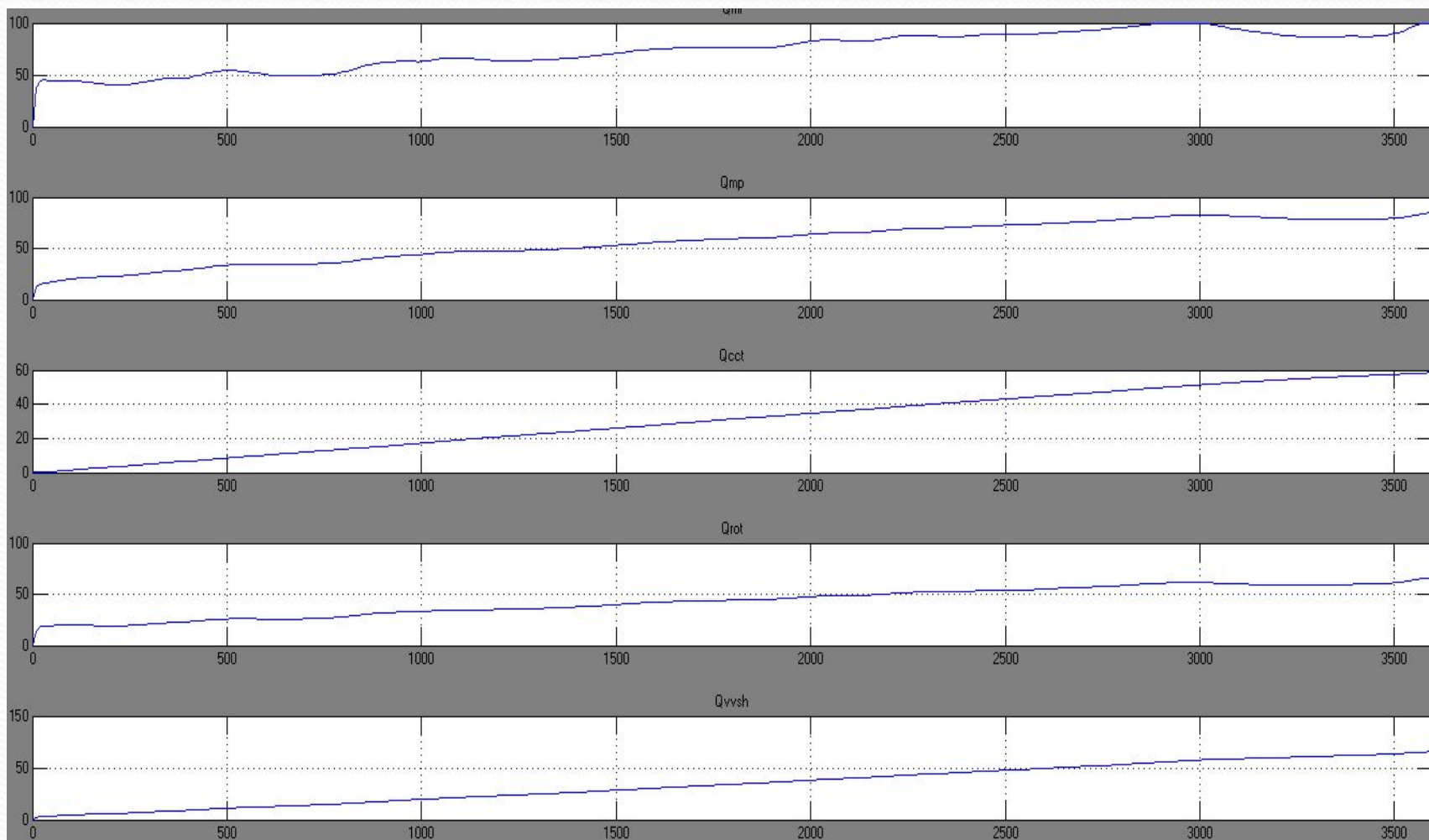
# Архитектура нейронной сети для теплового расчёта



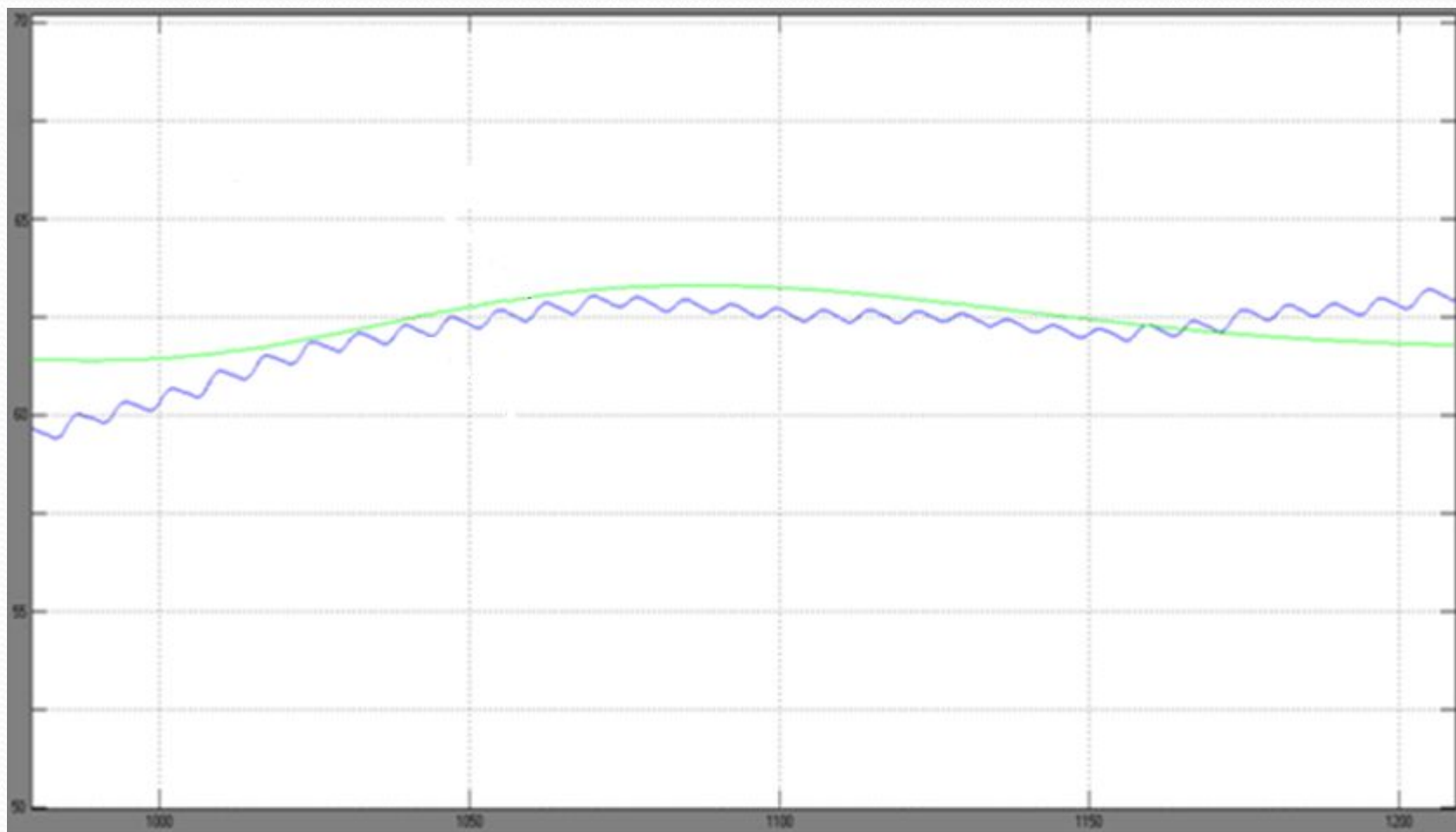
# Модель для исследования переходных процессов в АД



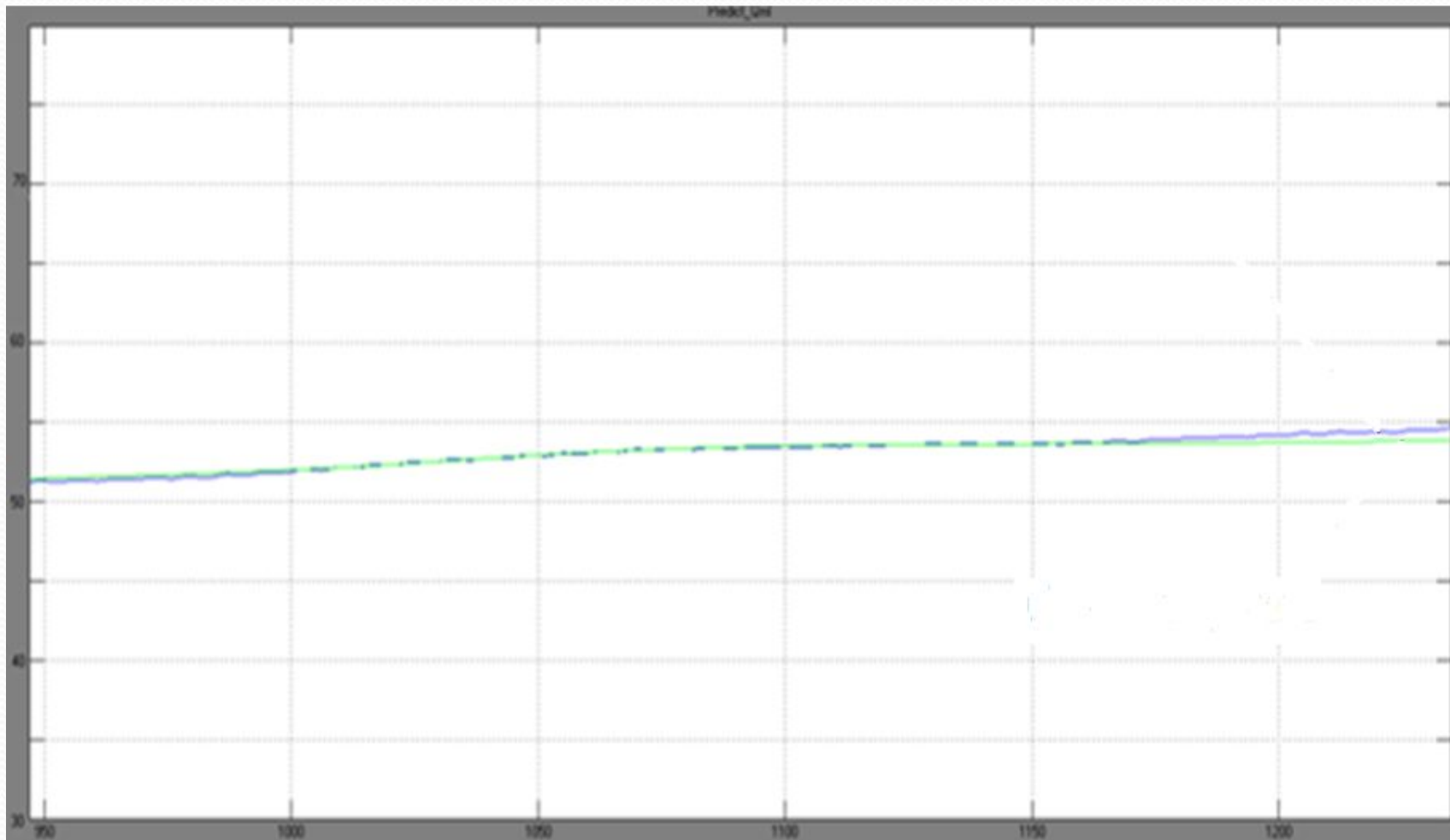
# Графики температур



# Температура лобовых частей обмотки статора



# Температура пазовых частей обмоток статора



# Максимальные значения отклонения температуры

	<b>Лобовые части обмоток статора</b>	<b>Пазовые части обмоток статора</b>	<b>Сердечник статора</b>	<b>Ротор</b>	<b>Воздух внутри машины</b>
<b>Расчётное значение <math>t</math> в точке max отклонения (метод мат. моделирования), °C</b>	<b>59.8</b>	<b>55</b>	<b>48.5</b>	<b>54</b>	<b>72.7</b>
<b>Расчётное значение <math>t</math> в точке max отклонения (моделирование на основе ИНС), °C</b>	<b>61.8</b>	<b>54</b>	<b>48</b>	<b>53</b>	<b>72</b>
<b>% выражение отклонения <math>t</math></b>	<b>3.2</b>	<b>1.8</b>	<b>1</b>	<b>1.9</b>	<b>1</b>

# диссертационной работы на патентную чистоту

- Изменение структуры нейронной сети;
- Изменение математических моделей расчёта тепловых и электромагнитных процессов;
- Разработка новых методов обучения ИНС.

**Спасибо за  
внимание!**