

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Факультет систем управления и робототехники

Электрические машины

Лабораторная работа №2  
АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Студент: Кирбаба Д.Д.

Группа: R3338

Преподаватель: Усольцев А.А.

г. Санкт-Петербург

2023

## Задание

По результатам эксперимента определить параметры схемы замещения.

Построить экспериментальные и расчётные

- механические и электромеханические характеристики;
- рабочие характеристики;
- кривые погрешности для всех характеристик.

Провести анализ полученных результатов и сделать выводы о качестве эксперимента.

## Обработка результатов эксперимента

Экспериментальная механическая характеристика асинхронного двигателя:

$$\begin{aligned} M_{IM}(n) &= M_L(n) - M_{tf}(n) - M_{vf}(n) = \\ &= M_L(n) + \frac{M_L(0_+) - M_L(0_-)}{2} \cdot \text{sign}(n) + \frac{\frac{M_L(0_+) - M_L(0_-)}{2} - M_L(n_0)}{n_0} n, \end{aligned}$$

где  $M_L(n)$  — момент нагрузочной машины,  $M_{tf}(n)$  — момент сухого трения,  $M_{vf}(n)$  — момент вязкого трения.

Определим значения  $M_{tf}(n)$  и  $M_{vf}(n)$  чтобы получить характеристику  $M_{IM}(n)$ , которой и будем пользоваться в дальнейшем.

При эксперименте мы получили график  $M_L(n)$ .

Программный код:

```
% calculate dry and viscous friction
Mtf_s = abs(ML_gen_m(1) - ML_br_m(end)) / 2; % starting dry moment
M_se = ML_gen_m(1) + Mtf_s; % starting moment

ML_m = [ML_br_m M_se ML_gen_m];

Mtf = -Mtf_s * sign(n_modeling);
Mvf = (ML_m(idle_speed_idx) - Mtf(idle_speed_idx)) * n_modeling / n0;
MIM = ML_m - Mtf - Mvf;
```

```

M_motor = MIM(start_idx:idle_speed_idx);

%% plot n(M_IM), n(M_tf), n(M_L), n(M_vf)
grid on
hold on
plot(ML, n, LineWidth=2)
plot(Mtf, n_modeling, MIM, n_modeling, Mvf, n_modeling, LineWidth=2)
xlabel('M, Н\cdotм')
ylabel('n, об/мин')
legend('n(M_L)', 'n(M_{tf})', 'n(M_{IM})', 'n(M_{vf})')

```

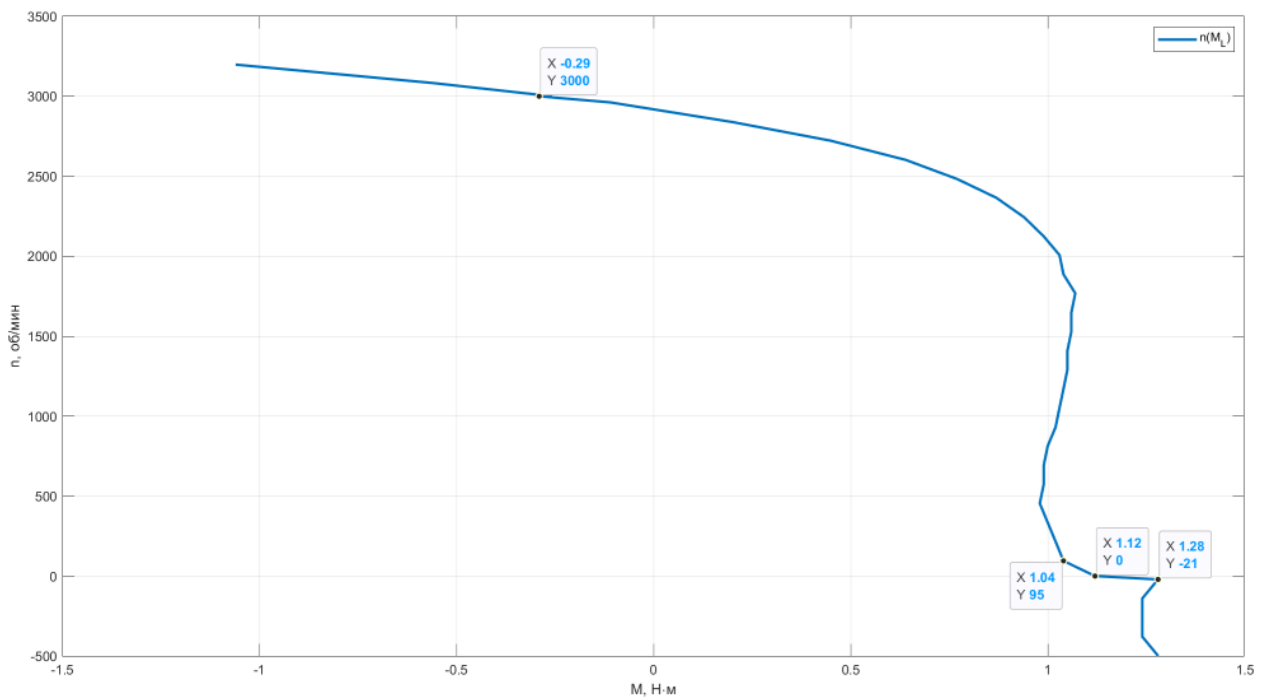


Рисунок 1. Экспериментальная механическая характеристика.

Итак, найдем

$$\frac{M_L(0_+) - M_L(0_-)}{2} = -0.1124 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Значит теперь мы можем посчитать истинный момент нагрузочной машины  $M_L$ .

Приведем графики:

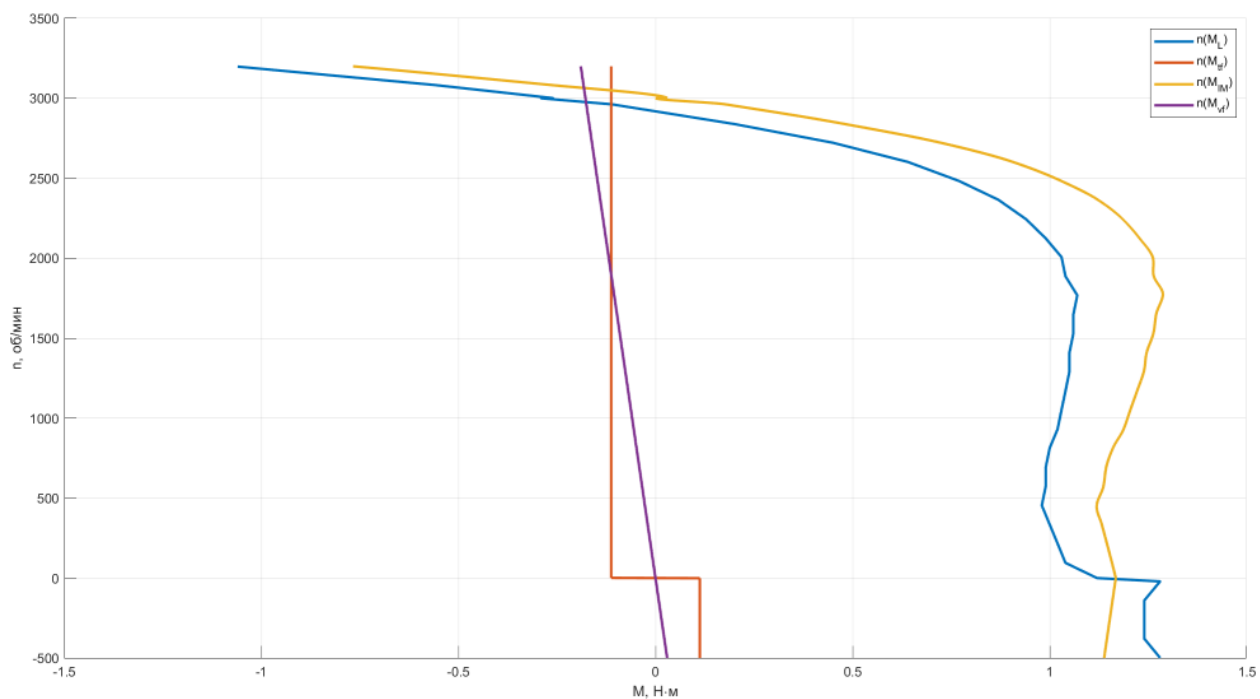


Рисунок 2. Компоненты экспериментальной механической характеристики.

Теперь, если построить зависимость истинной механической характеристики от скольжения, то можем определить по графику скольжение точки опрокидывания  $s_m$ .

Для того чтобы сформировать массив со значениями скольжений воспользуемся определением понятия:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

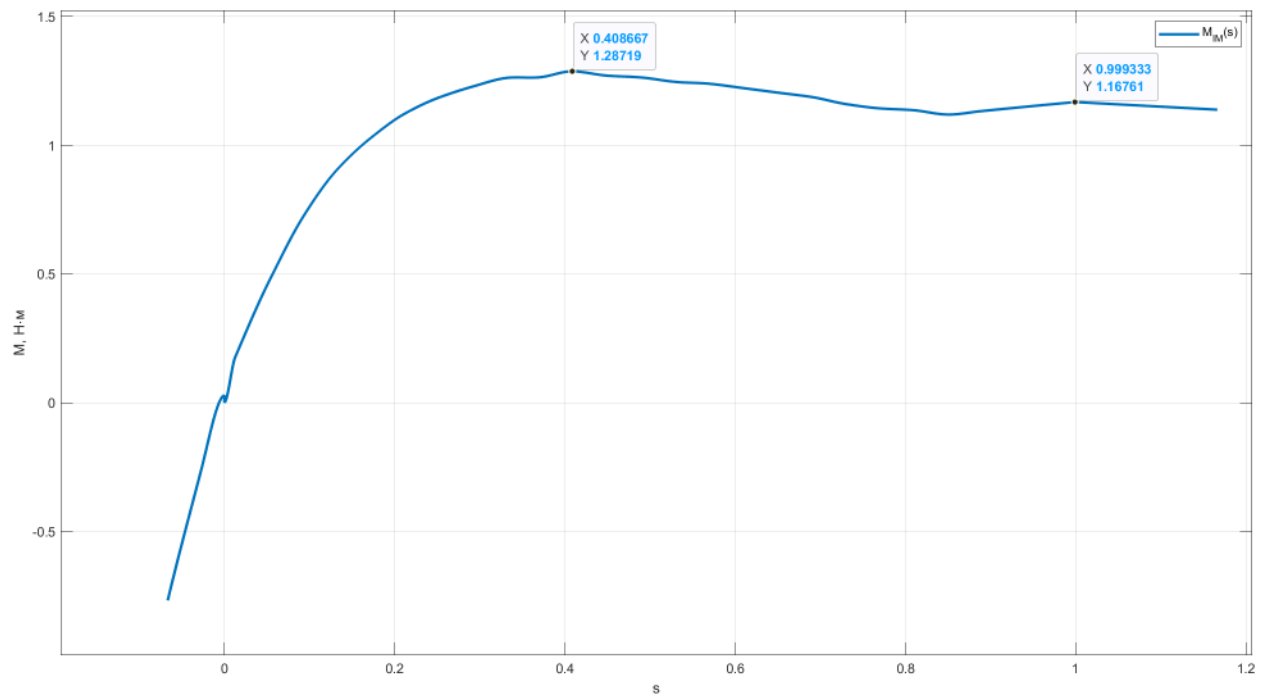


Рисунок 3. Зависимость момента от скольжения.

Программный код поиска:

```
s_m = s_modeling(MIM == max(MIM));
U_calcs = mean(U);
```

$$s_m = 0.4087$$

Пусковой момент:

$$M_{se} = 1.16759 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

## Определение параметров схемы замещения

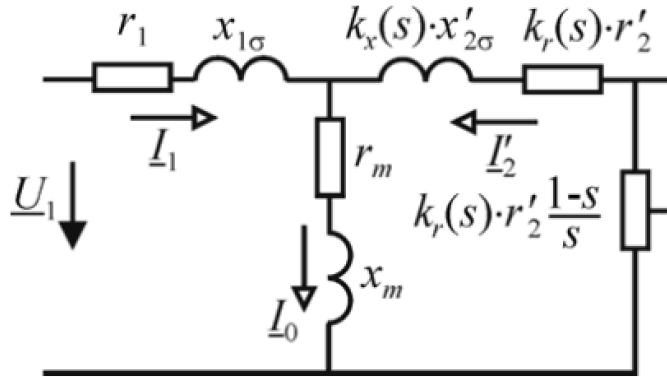


Рисунок 4. Схема замещения.

Суммарное активное сопротивление:

$$r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_1(n_0)}{(I_1(n_0))^2},$$

где  $P_1(n_0)$  – активная мощность (универсальный прибор на стенде измеряет фазную мощность, а в файл данных выводится суммарная потребляемая мощность, т.е. значение в три раза больше показаний прибора), потребляемая двигателем с числом пар полюсов  $z_p$  при скорости вращения  $n_0 = \frac{60f_1}{z_p}$ ,

$I_1(n_0)$  – фазный ток статора при синхронной скорости.

$$P_1(n_0) = 7.7277 \text{ Вт}, \quad I_1(n_0) = 0.1300 \text{ А}$$

$$r_0 = 457.258 \text{ Ом}$$

Суммарное индуктивное сопротивление:

$$x_0 = x_{1\sigma} + x_m = \frac{Q_1(n_0)}{(I_1(n_0))^2} = \frac{U_1 \sin(\varphi_0)}{I_1(n_0)},$$

где  $U_1$  – действующее значение фазного напряжения,  $\varphi_0 = \arccos\left(\frac{P_1(n_0)}{U_1 I_1(n_0)}\right)$ .

$$\cos \varphi_0 = 0.6007, \quad U_1(n_0) = 228.0488 \text{ В}$$

$$x_0 = 1053.7 \text{ Ом}$$

Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора:

$$x_{1\sigma} = x'_{2\sigma} = \frac{1}{2} \frac{U_1 \sin(\varphi_k)}{I_1(0)},$$

где  $I_1(0)$  — ток статора при неподвижном роторе,  $\varphi_k = \arccos\left(\frac{P_1(0)}{U_1 I_1(0)}\right)$ .

$$I_1(0) = 1.51 \text{ A}, \quad P_1(0) = 281.7107 \text{ Вт}$$

$$x_{1\sigma} = x'_{2\sigma} = 44.6252 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:

$$x_m = x_0 - x_{1\sigma} = 1009.1 \text{ Ом}$$

Коэффициент приведения Т-образной схемы к Г-образной:

$$c_1 = 1 + \frac{x_{1\sigma}}{x_m} = 1.0442$$

Сопротивление ротора:

$$r'_2(s) = \frac{M(s)2\pi f_1 s}{m_1(I_1(s))^2 z_p}$$

Построим график, чтобы получить значение сопротивления ротора. Так как оно остаётся практически постоянным в большой области около точки опрокидывания, то сможем определить это вручную.

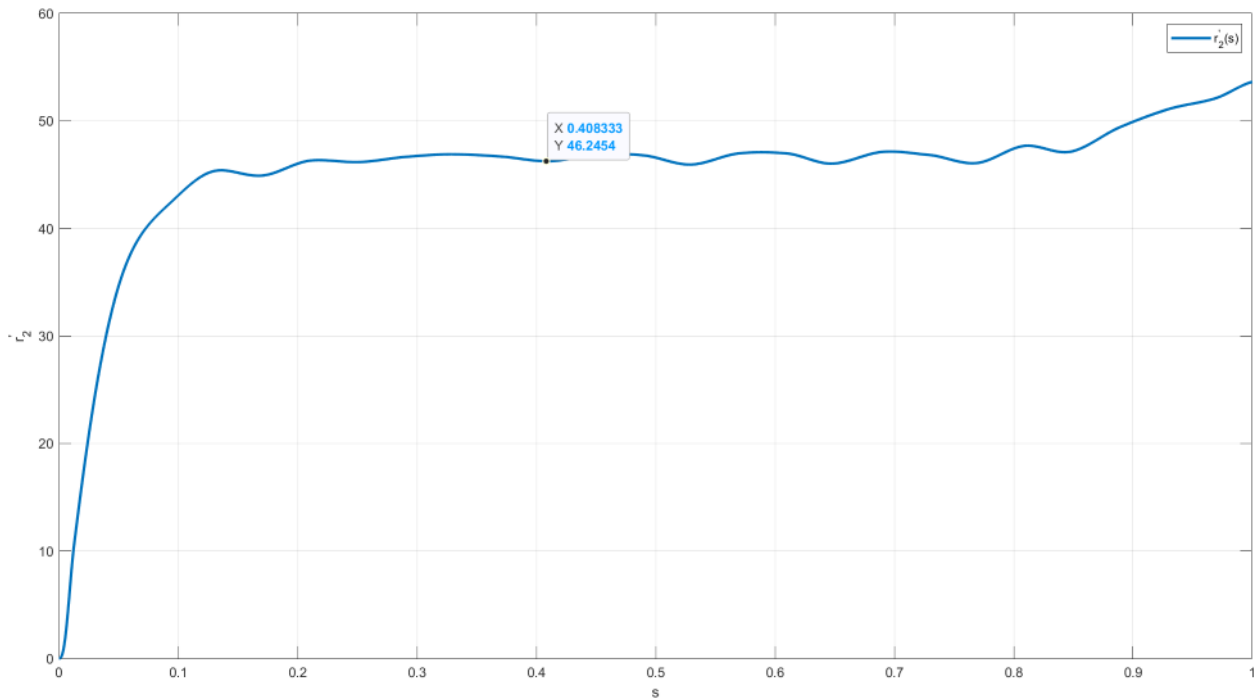


Рисунок 5. График зависимости сопротивления ротора от скольжения.

Видим участок с почти постоянным значением сопротивления около точки опрокидывания, а значит

$$r'_2 = r'_2(s_m) = 46.2449 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление статора через критическое скольжение:

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \Rightarrow r_1 = \sqrt{\left(\frac{r'_2}{s_m}\right)^2 - x_k^2} = 69.5677 \text{ Ом}$$



Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$r_m = r_0 - r_1 = 387.6906 \text{ Ом}$$

Коэффициенты вытеснения:

$$\xi \approx h|_{s=1}$$

$$k_r(1) = k_r(h) = h \frac{sh2h + \sin 2h}{ch2h - \cos 2h}$$

$$k_x(1) = k_x(h) = \frac{3}{2h} \frac{sh2h + \sin 2h}{ch2h - \cos 2h}$$

Глубина паза (численным решением уравнения):

$$\frac{z_p m_1 U_1^2 r_2 k_r(h)}{\omega_1 ((r_1 + r_2' k_r(h))^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' k_x(h))^2)} = M_{st},$$

где  $M_{st}$  — вычисленное ранее значение пускового момента.

Построим график:  $M_s(h) - M_{se}$  и линию  $M = 0$  и найдем нули функции.

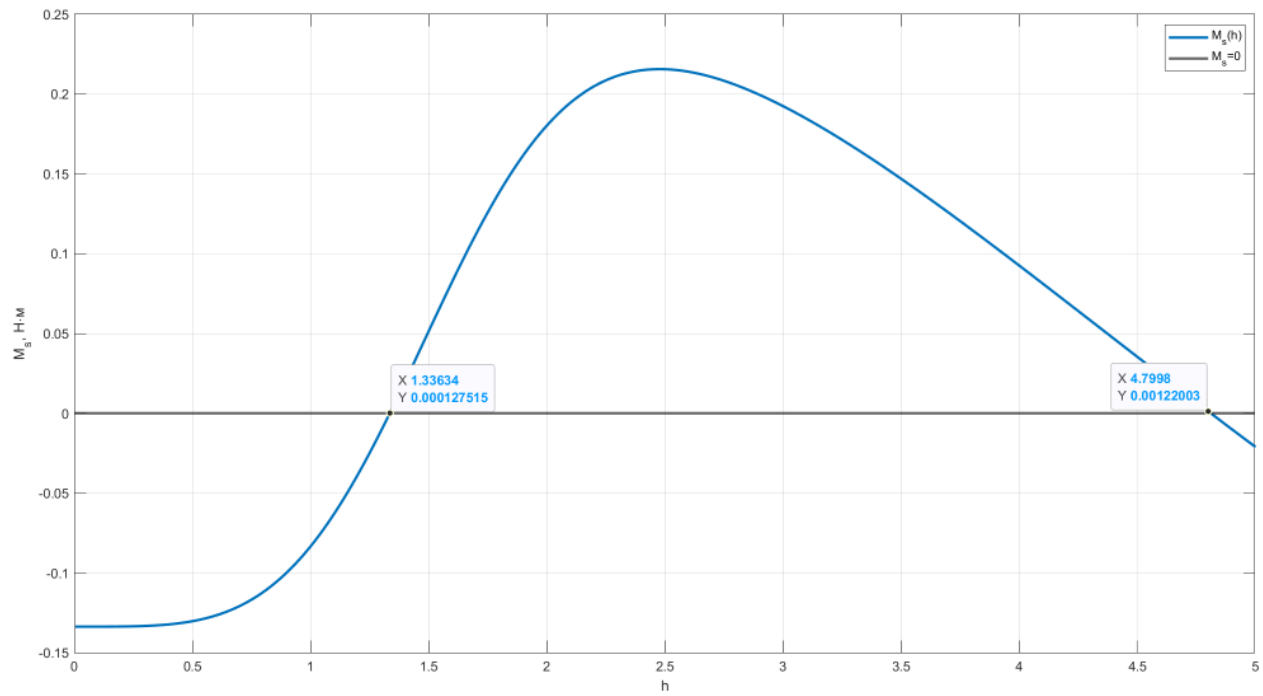


Рисунок 6. График  $M_s(h) - M_{se}$ .

Берем наименьший корень.

Итого,

$$h = 1.90417 \text{ мм}$$

## Расчет характеристик асинхронного двигателя

Механическую, электромеханическую и рабочие характеристики АД можно рассчитать, пользуясь схемой замещения предоставленной в начале.

Входное сопротивление схемы замещения:

$$Z_{in}(s) = Z_1 + \frac{Z_m Z_2(s)}{Z_m + Z_2(s)} = r_1 + jx_{1\sigma} + \frac{(r_m + jx_m)(k_r(s) \cdot \frac{r'_2}{s} + jk_x(s) \cdot x'_{2\sigma})}{r_m + k_r(s) \cdot \frac{r'_2}{s} + j(x_m + k_x(s) \cdot x'_{2\sigma})}$$

Теперь можем определить зависимость коэффициента мощности от скольжения

$$\cos(\varphi_1(s)) = \arctg\left(\frac{\text{Im}Z_{in}(s)}{\text{Re}Z_{in}(s)}\right)$$

Предоставим графики эксперимента и моделирования коэффициента мощности (по формуле выше):

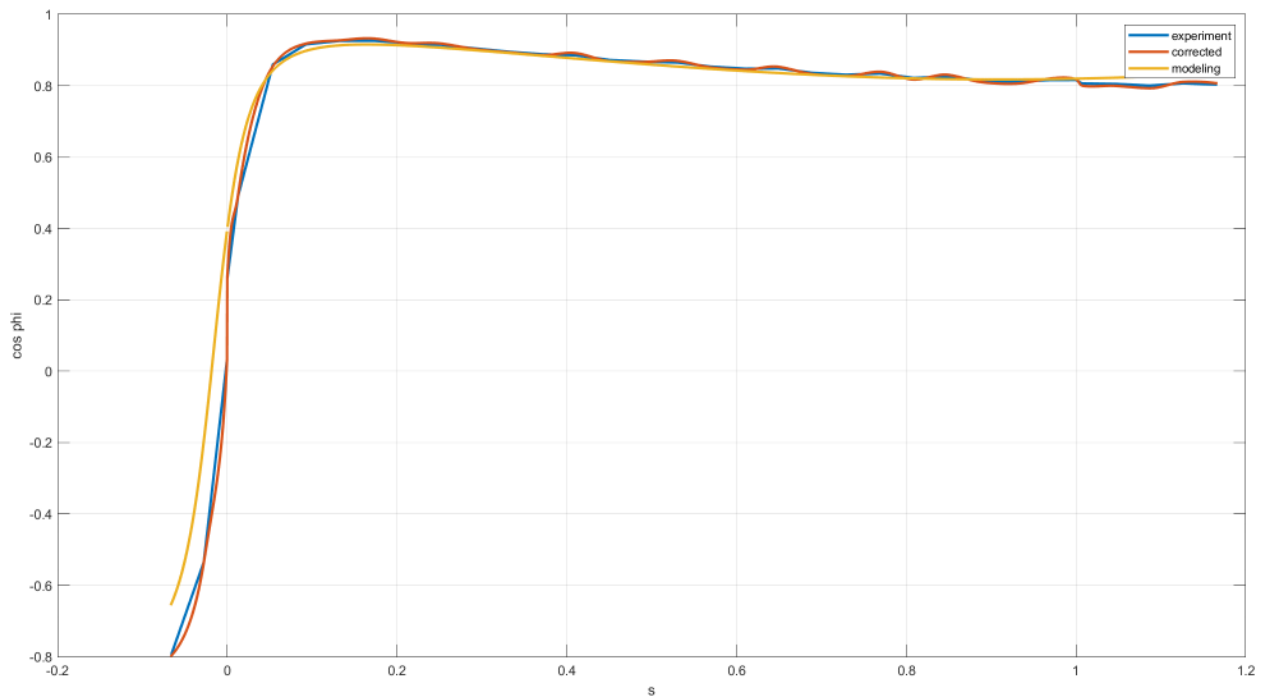


Рисунок 7. Графики коэффициента мощности (экспериментальный, скорректированный, смоделированный).

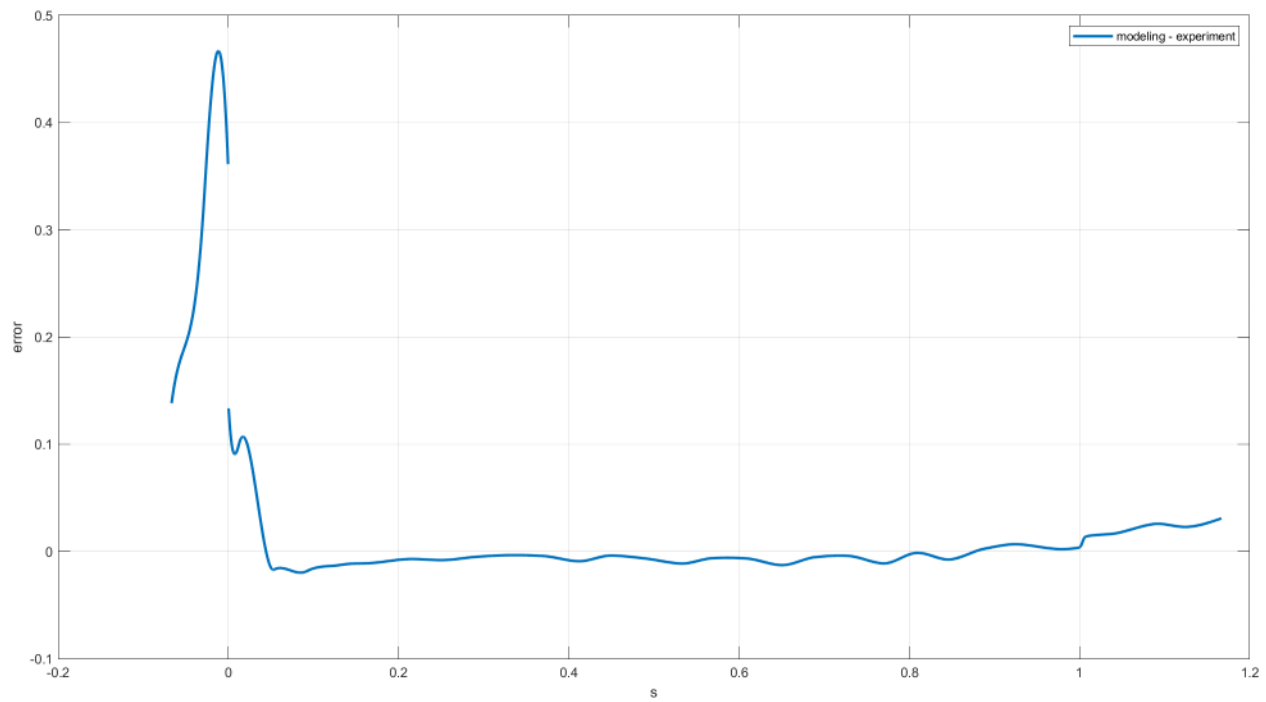


Рисунок 8. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

По закону Ома токи статора и ротора найдем в виде:

$$I_1(s) = \frac{U_1}{Z_{in}(s)}$$

$$I'_2(s) = \frac{I_1(s) \cdot Z_m}{Z_m + Z_2(s)} = \frac{I_1(s) \cdot (r_m + jx_m)}{r_m + k_r(s) \cdot \frac{r'_2}{s} + j(x_m + k_x(s) \cdot x'_{2\sigma})}$$

Построим электромеханические характеристики:

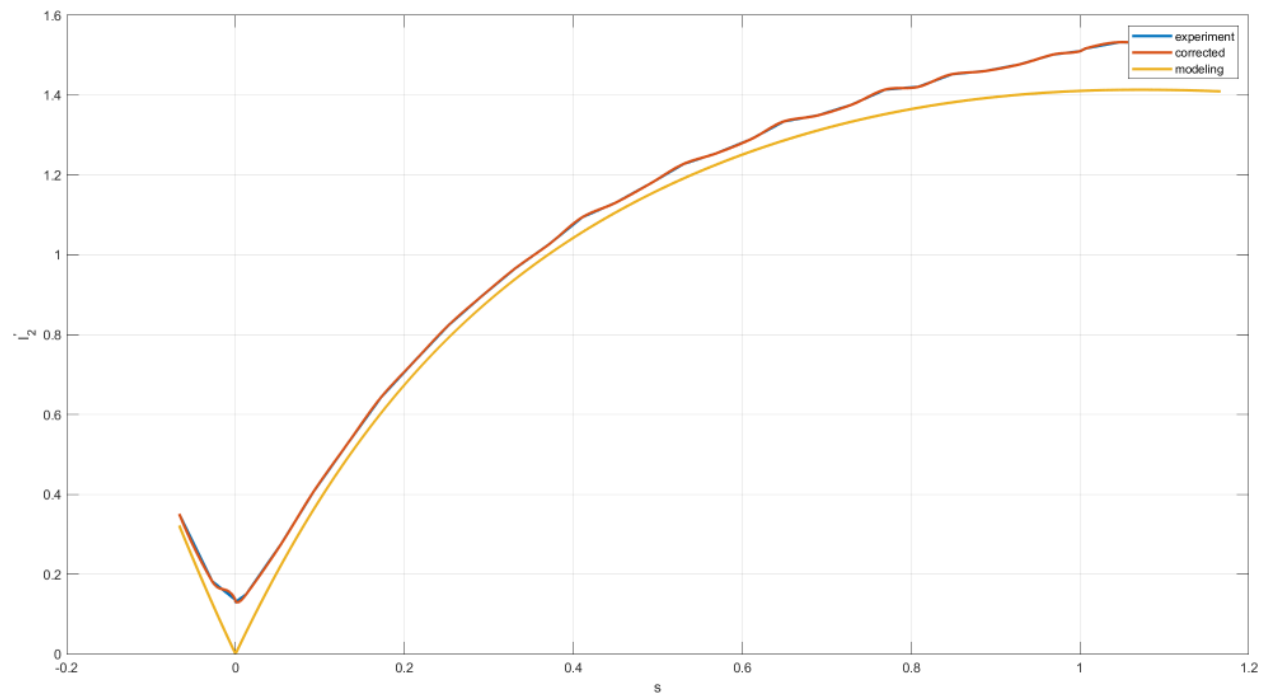


Рисунок 9. Электромеханические характеристики (экспериментальная, скорректированная, смоделированная).

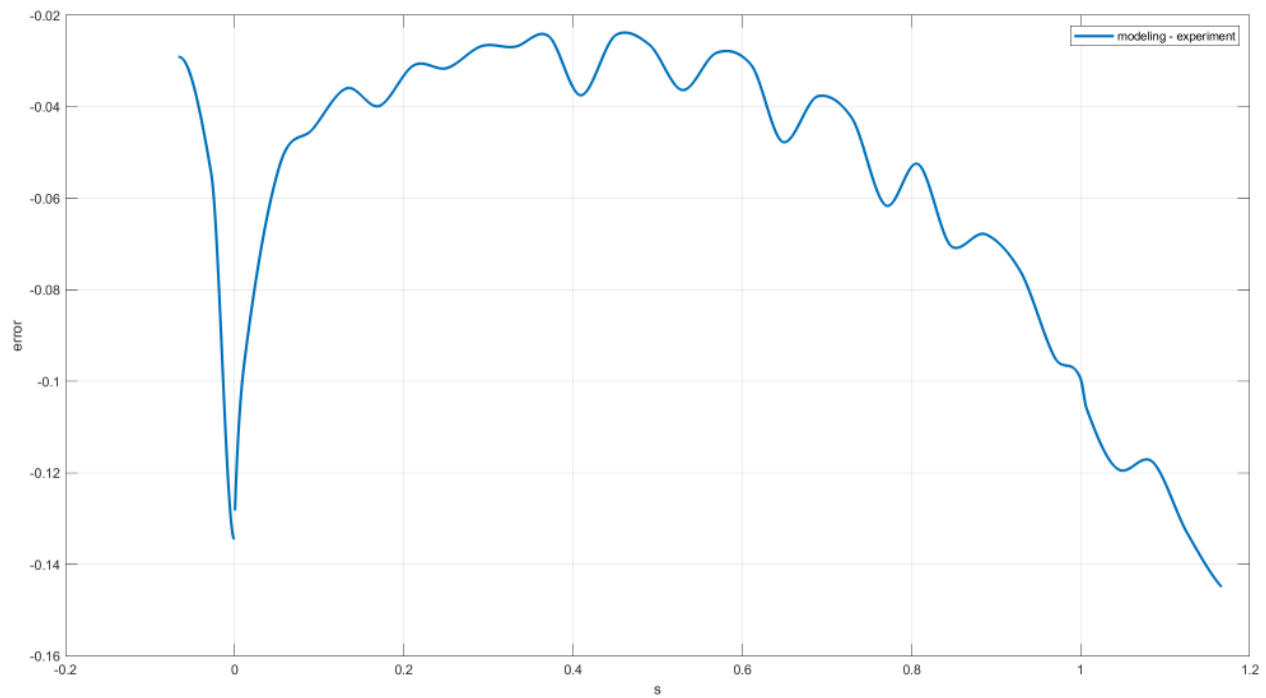


Рисунок 10. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

Модуль  $|I_1(s)|$  является уравнение электромеханической характеристики и позволяет получить зависимость потребляемой активной мощности от скольжения

$$P_1(s) = m_1 U_1 |I_1(s)| \cos(\varphi_1(s))$$

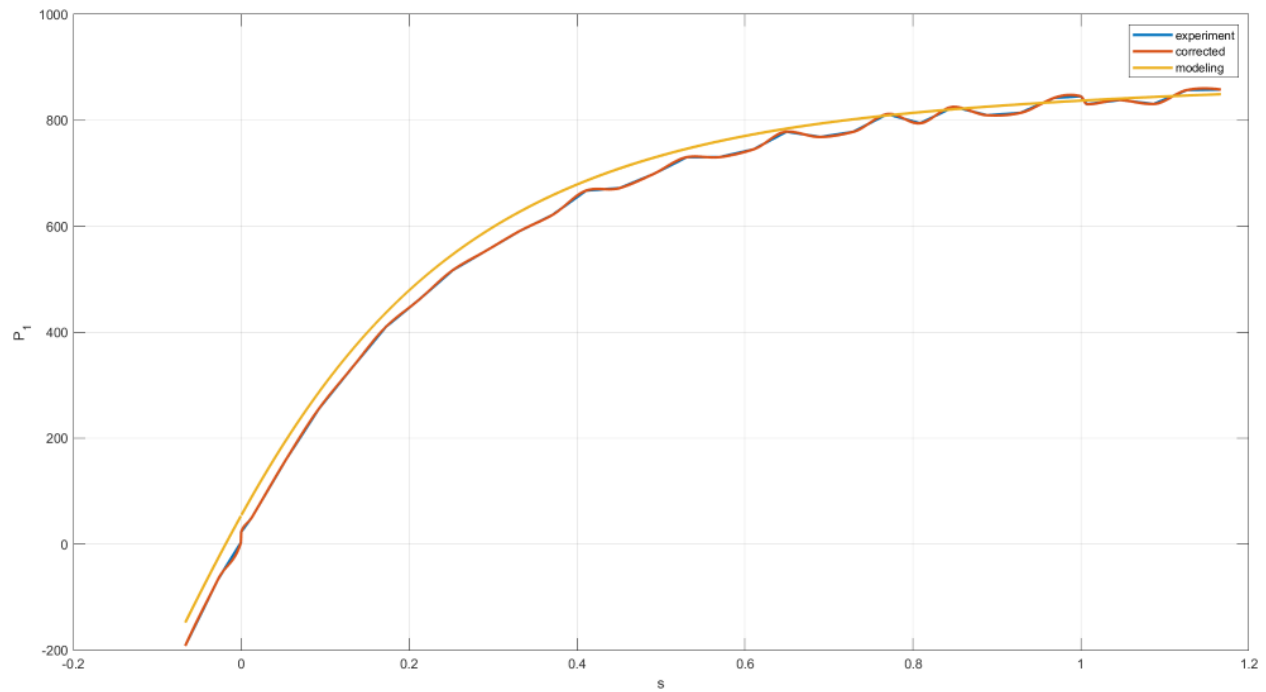


Рисунок 11. Графики активной мощности (экспериментальный, скорректированный, смоделированный).

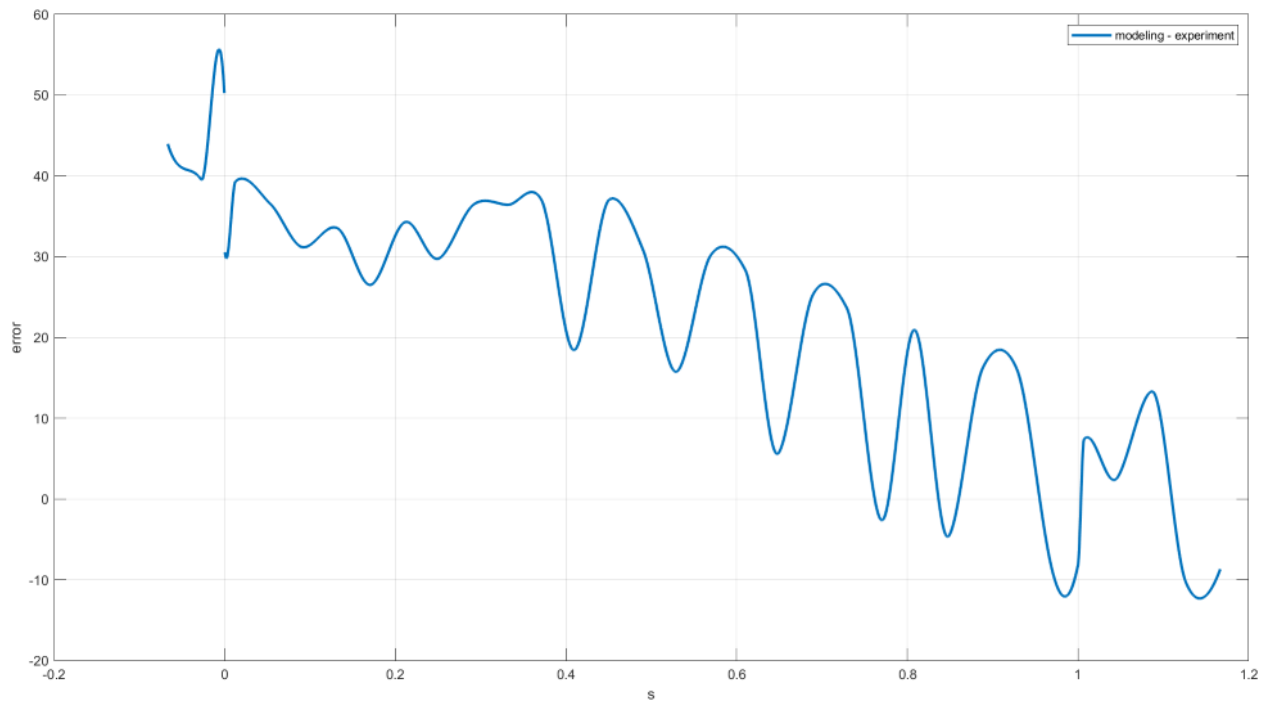


Рисунок 12. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

Пользуясь модулем  $|I'_{2(s)}|$  можно найти выражение для механической мощности и уравнение механической характеристики:

$$P_{mech}(s) = m_1 |I'_{2(s)}|^2 k_r(s) \cdot r'_2 \frac{1-s}{s}$$

$$M_{IM}(s) = \frac{P_{mech}(s)}{\Omega} = \frac{z_p P_{mech}(s)}{2\pi f_1 (1-s)}$$

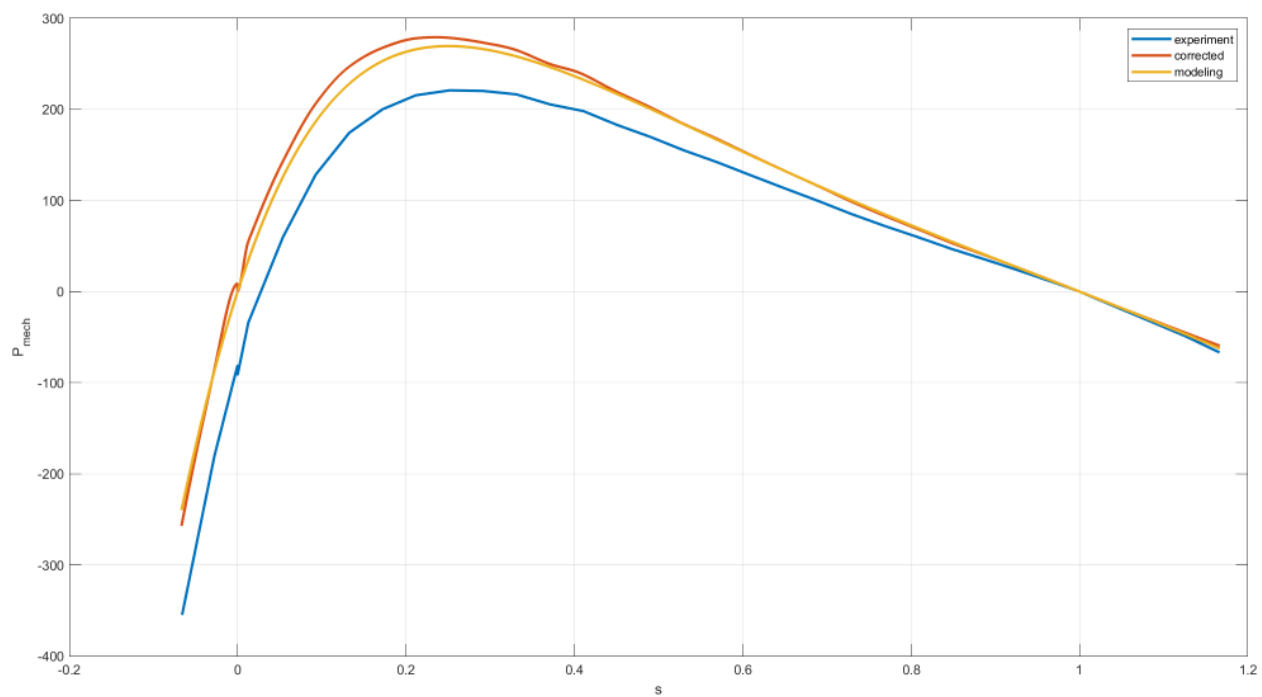


Рисунок 13. Механическая мощность (экспериментальная, скорректированная, смоделированная).

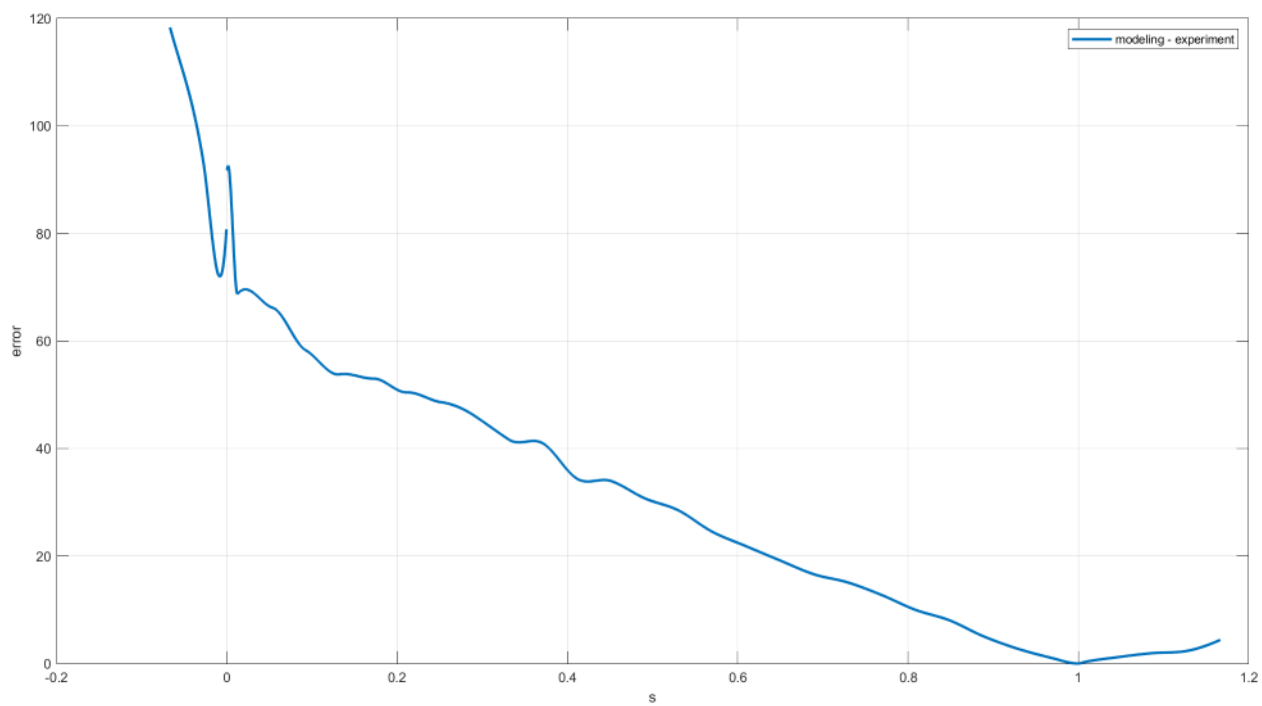


Рисунок 14. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.



Построим графики механических характеристик:

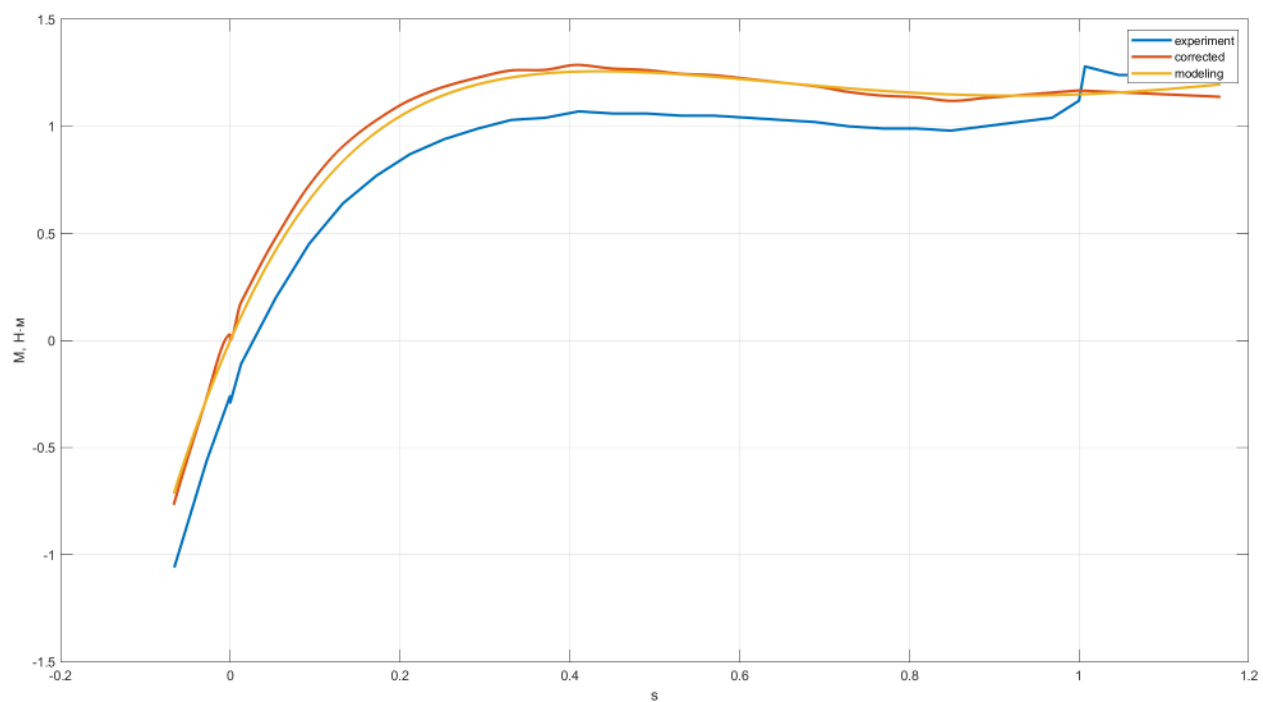


Рисунок 15. Механические характеристики (экспериментальная, скорректированная, смоделированная).

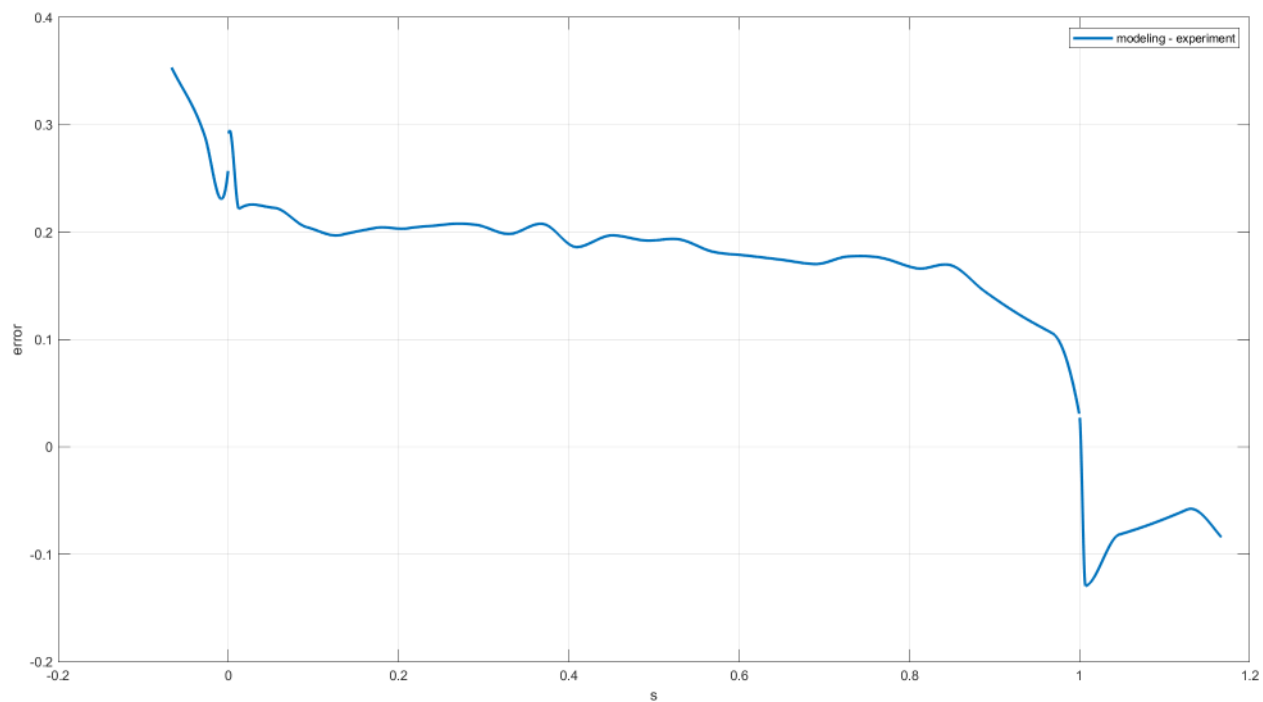


Рисунок 16. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

КПД машины в режимах двигателя и генератора:

$$\eta_m(s) = \frac{P_{mech}(s)}{P_1(s)}$$

$$\eta_g(s) = \frac{P_1(s)}{P_{mech}(s)}$$

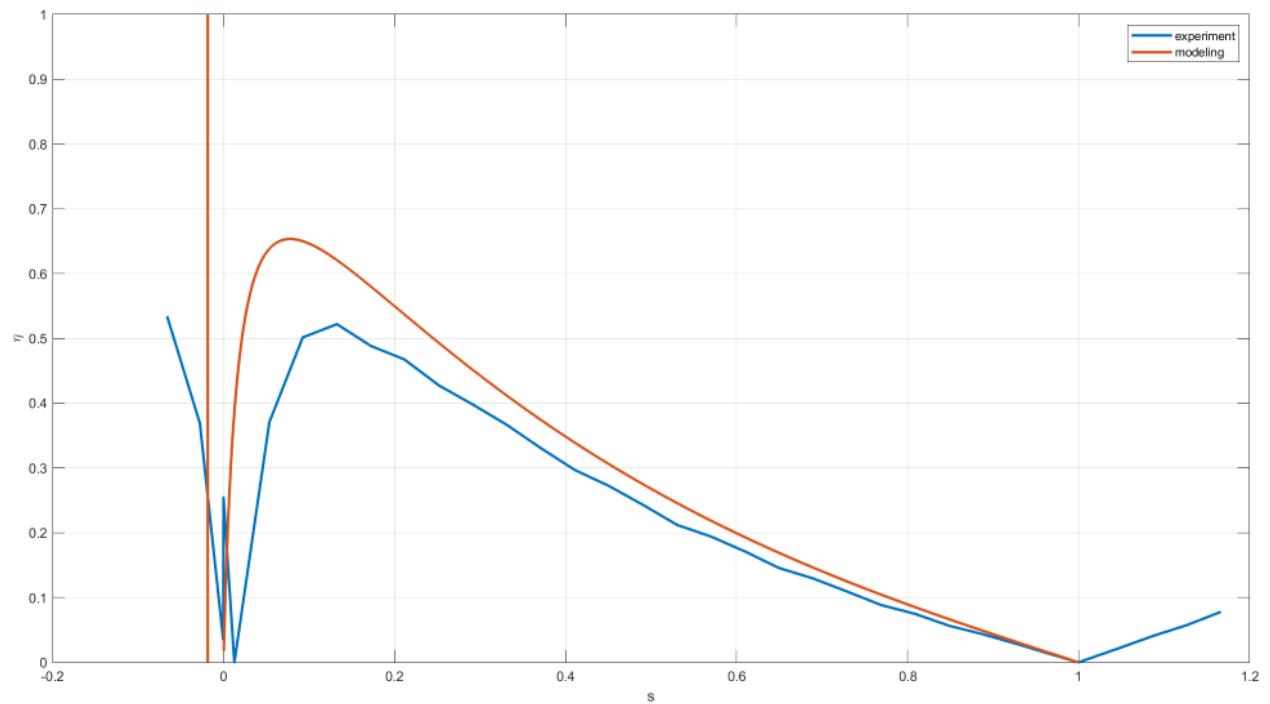


Рисунок 17. Графики КПД (экспериментальный и смоделированный).

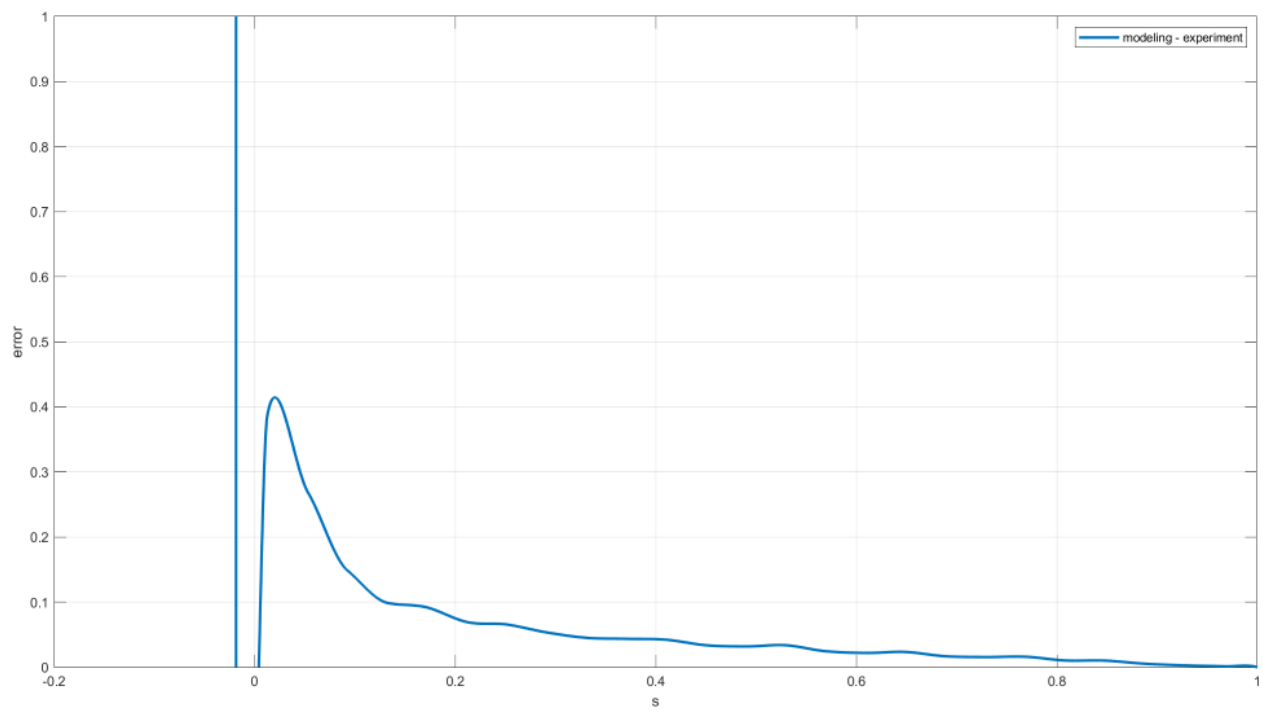


Рисунок 18. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

## Рабочие характеристики

Теперь предоставим графики рабочих характеристик:

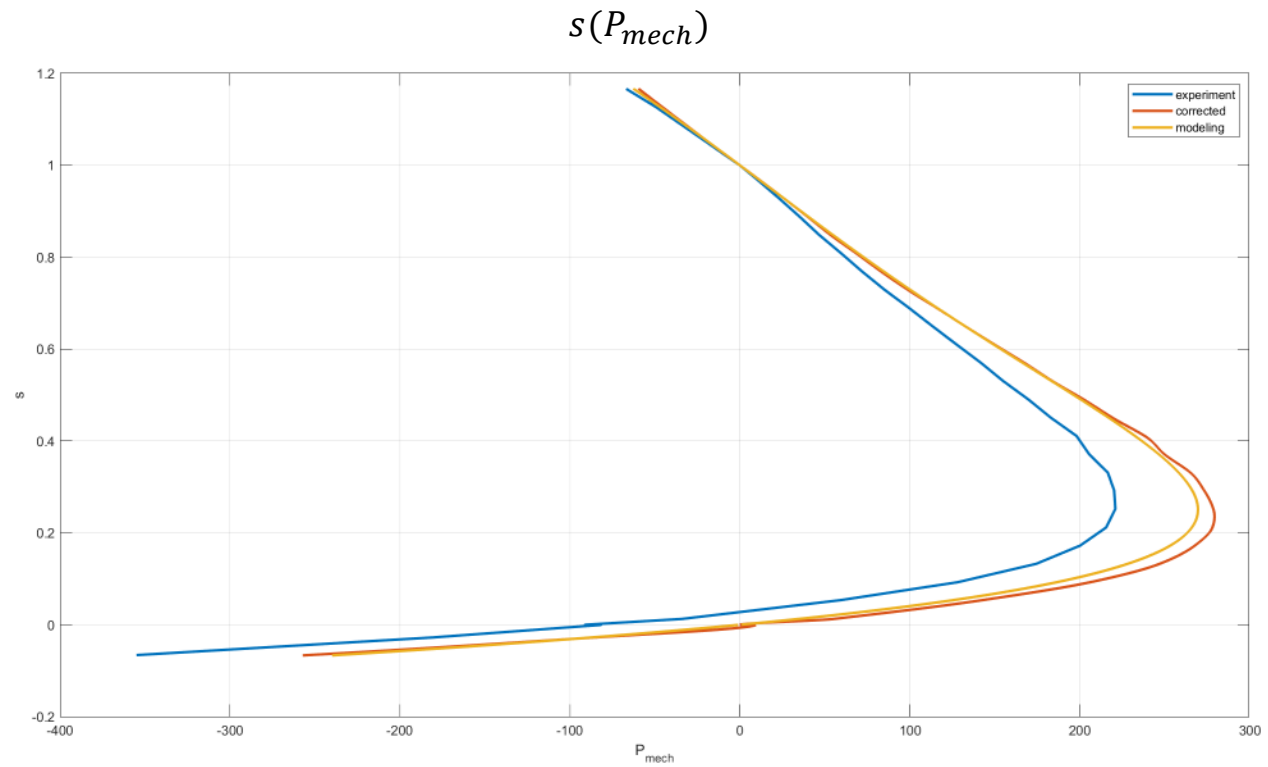


Рисунок 19. Графики рабочих характеристик  $s(P_{mech})$ .

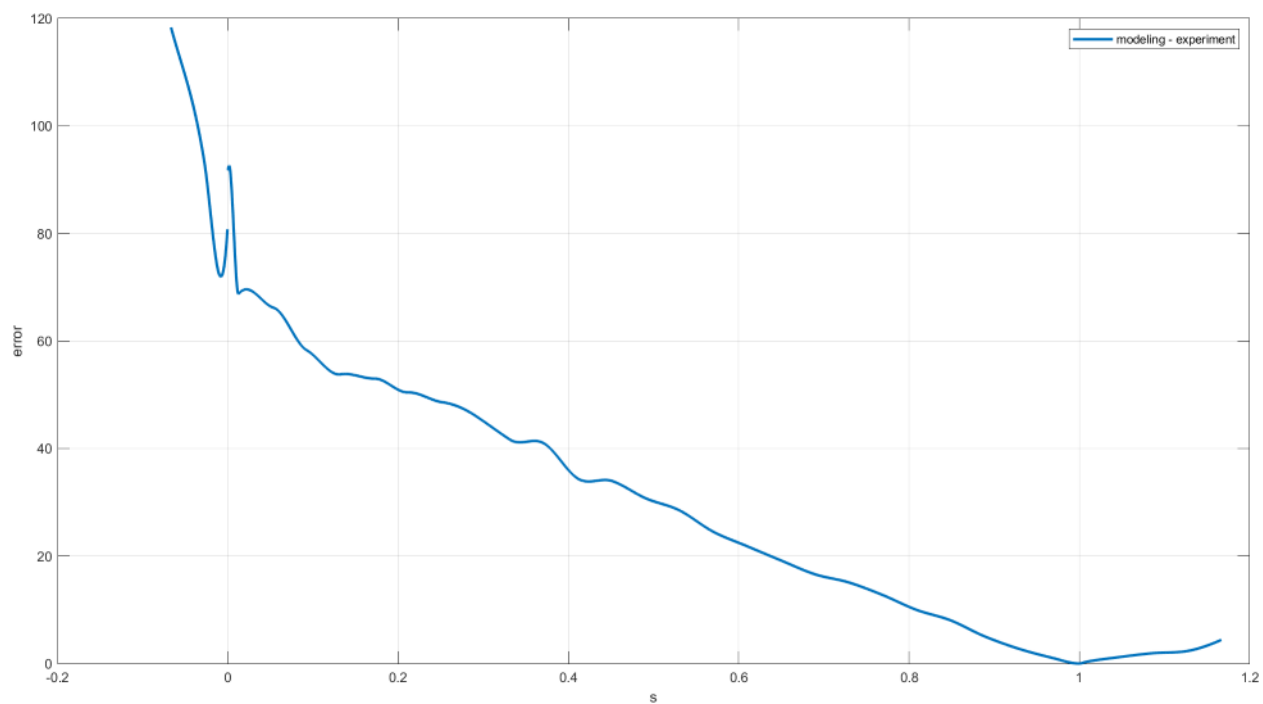


Рисунок 20. Кривая погрешности для эксперимента и моделирования.

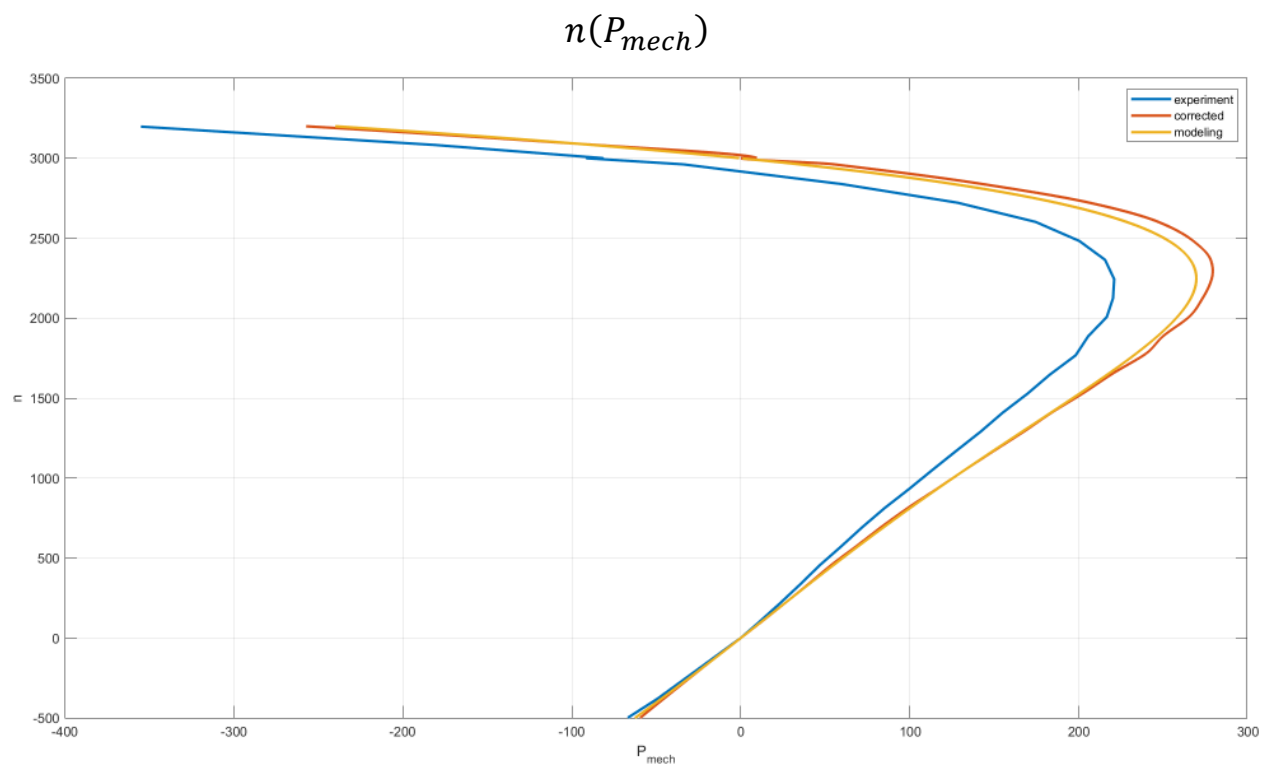


Рисунок 21. Графики рабочих характеристик  $n(P_{mech})$ .

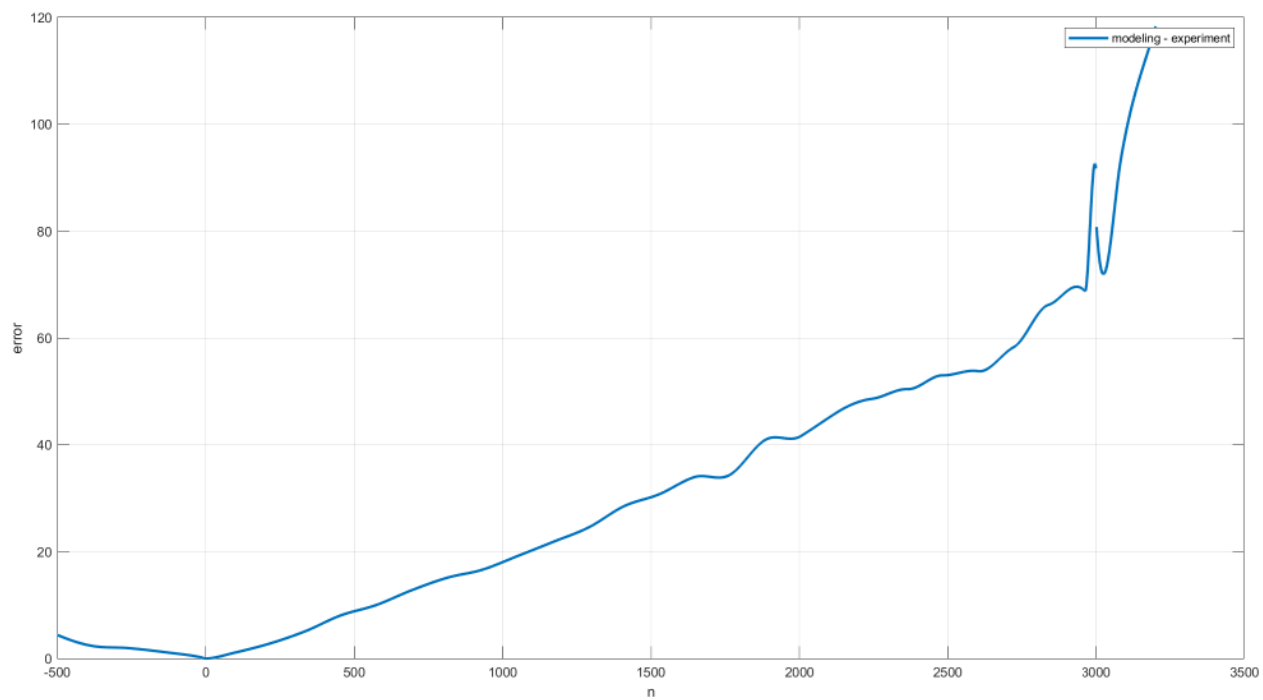


Рисунок 22. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

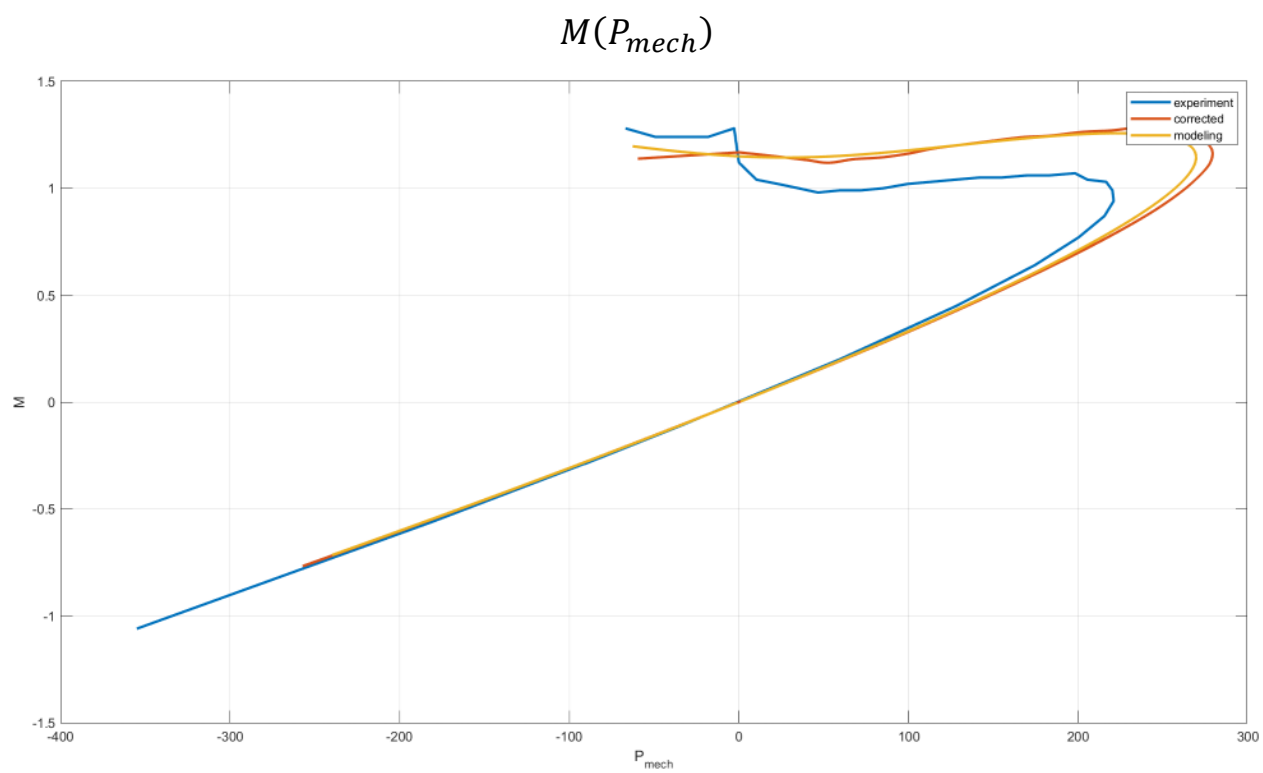


Рисунок 23. Графики рабочих характеристик  $M(P_{mech})$ .

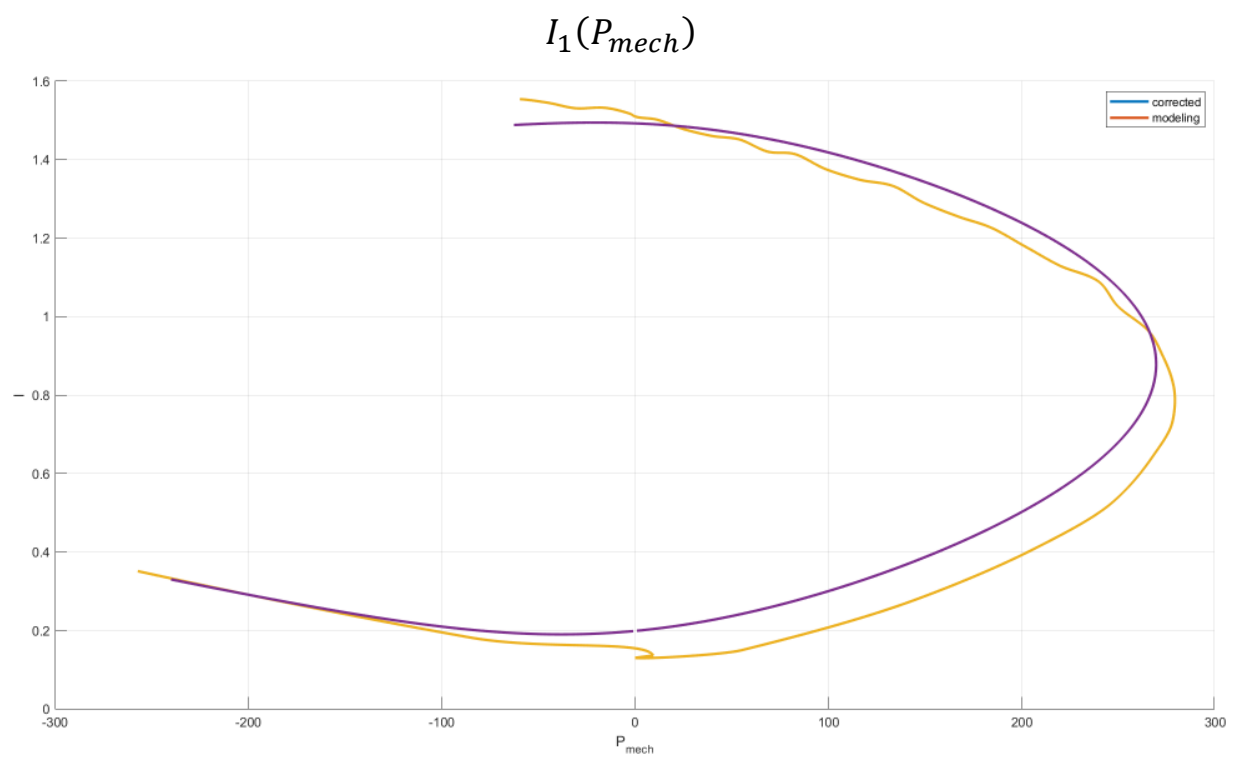


Рисунок 24. Графики рабочих характеристик  $I_1(P_{mech})$ .

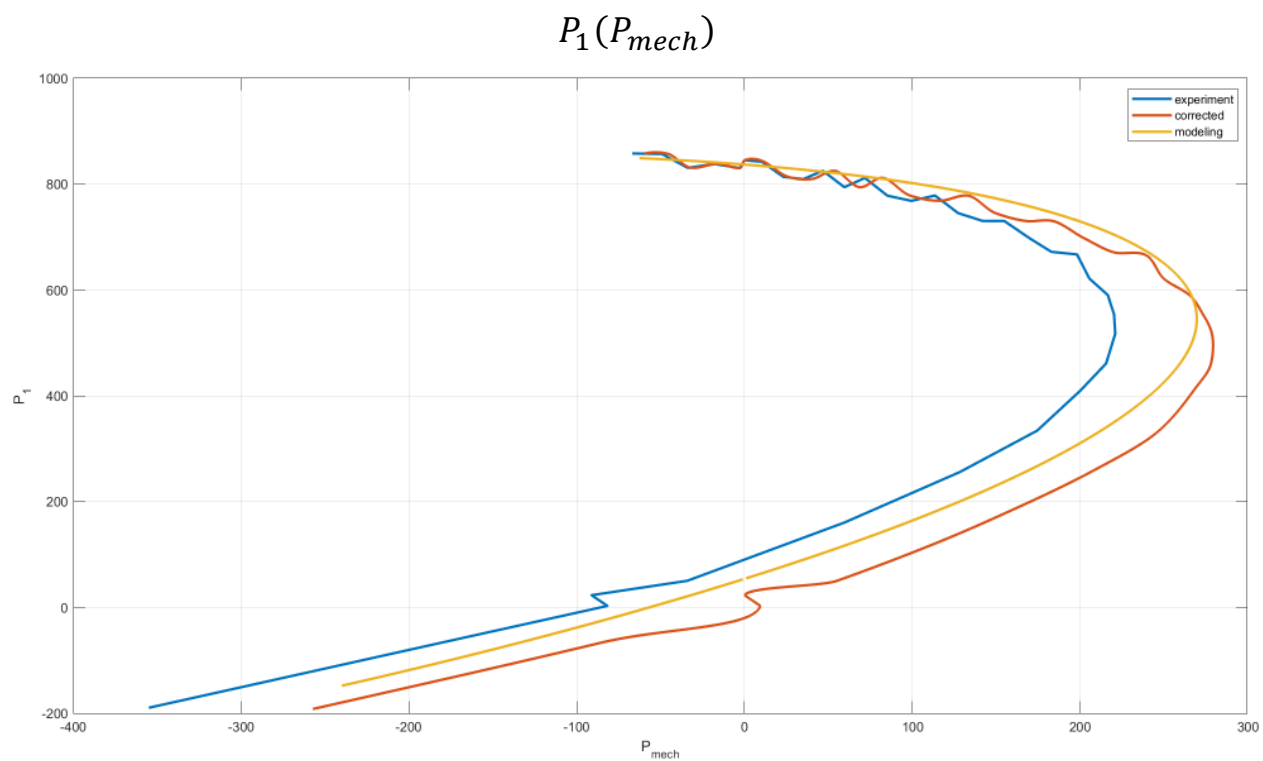


Рисунок 25. Графики рабочих характеристик  $P_1(P_{mech})$ .

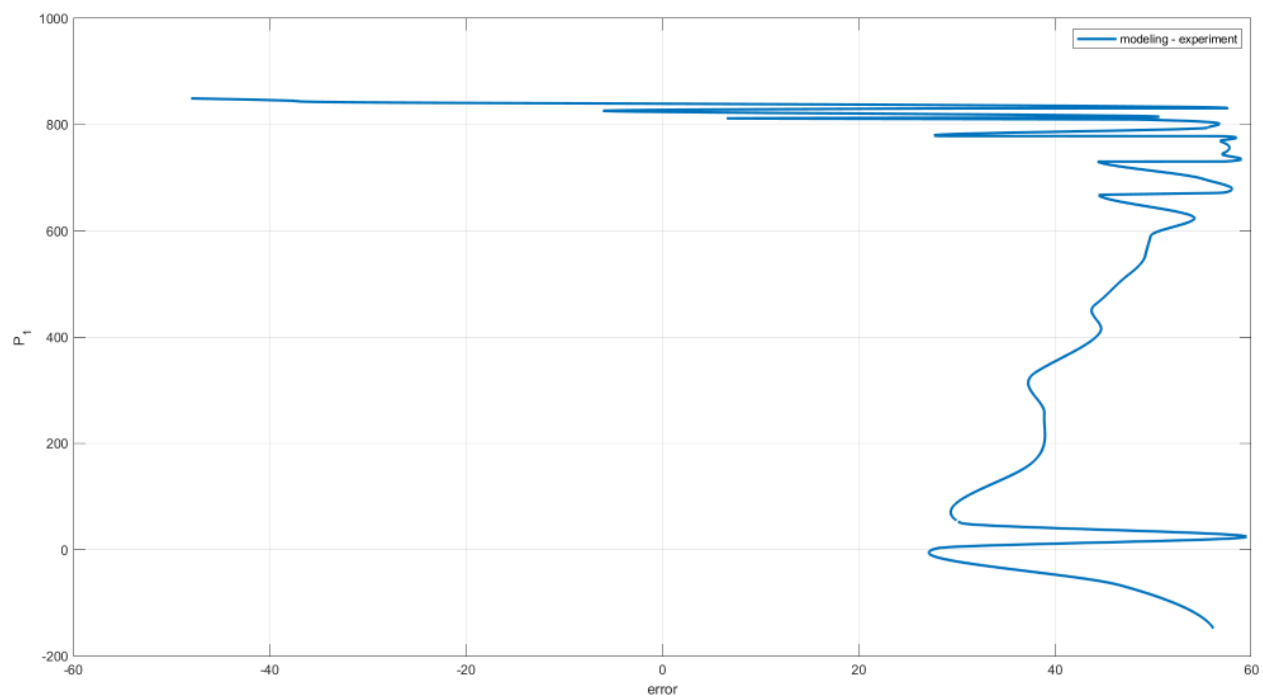


Рисунок 26. Кривая погрешности между экспериментом и моделированием.

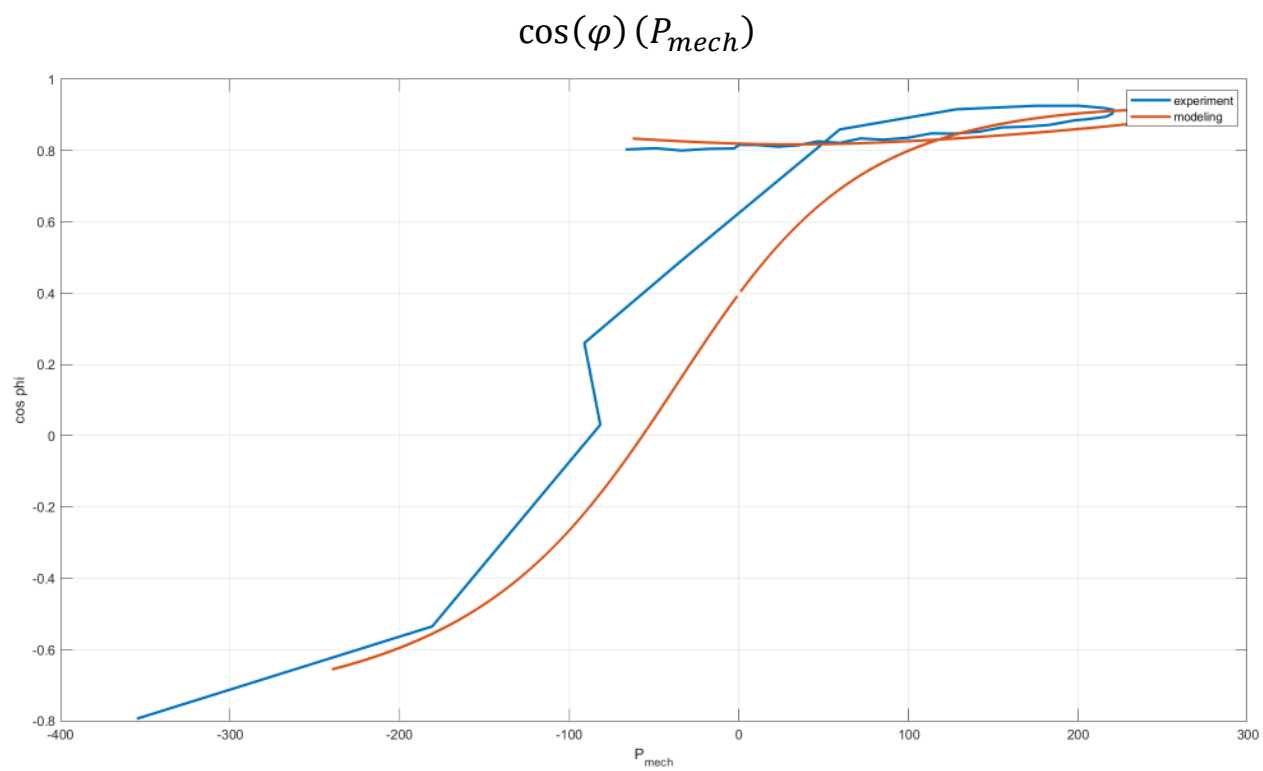


Рисунок 27. Графики рабочих характеристик  $\cos\varphi(P_{mech})$ .



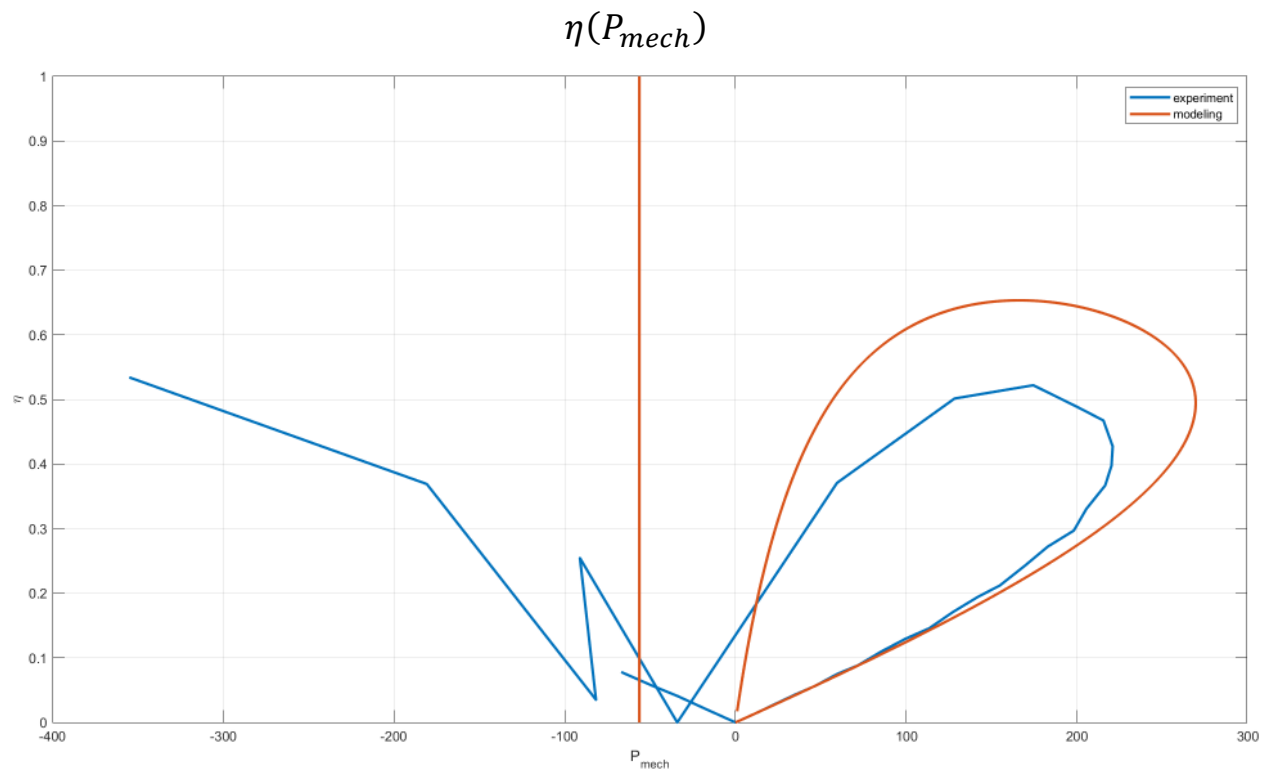


Рисунок 28. Графики рабочих характеристик  $\eta(P_{mech})$ .

## Выводы

Целью данной лабораторной работы являлось изучение асинхронного двигателя. Нам были даны экспериментальные данные, снятые с установки и требовалось:

- обработать данные
- найти параметры схемы замещения
- построить механическую и электромеханическую характеристики
- построить рабочие характеристики

В начале с помощью программ на Python и Matlab были обработаны исходные данные. Далее производились математические расчеты параметров схемы замещения АД, для дальнейшего построения характеристик и анализа правильности сделанной работы.

После расчета параметров АД, были построены графики характеристик (экспериментальные, скорректированные и смоделированные). Также к каждой характеристике была построена кривая погрешности, наглядно указывающая на уровень сходства и достоверности расчетов.

Исходя из анализа графиков можно сделать вывод, что параметры замещения найдены верно, так как графики имеют одинаковый вид (с точностью до погрешности). Также небольшие значения погрешности на основных частях кривых ошибки дает понять, что качество эксперимента хорошее.

Стоит отметить, что кривые ошибки имеют большое значение в краевых участках – это связано с несостыковкой диапазонов исходных данных и данных, полученных после обработки.