

---

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.313.33:004

Беляев В.П.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРЕМОНТИРОВАННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Белорусский государственный технологический университет, Беларусь*

В статье приведены некоторые результаты исследования электромеханических характеристик отремонтированных тяговых электродвигателей типоразмера ДК263Б на разработанной в среде MatLab–Simulink модели для тяговой тележки трамвайного вагона. Исследования позволяют создать базу данных отремонтированных электродвигателей с целью их подбора с близлежащими электромеханическими характеристиками для оптимальной совместной работы в электроприводе тяговой тележки. Результаты могут оценить качество ремонта любой из частей электродвигателя, обеспечивающей адекватное электромеханическое преобразование электроэнергии в двигателе.

**Ключевые слова:** электротранспорт, тяговый электродвигатель, моделирование.

**Постановка задачи.** Одним из представителей городского тягового электротранспорта является пассажирский трамвайный вагон. Он приводится в движение двумя транспортными тележками, каждая из которых имеет две пары ведущих колёс [1, 2]. Каждая пара колёс расположена на одной оси, приводящейся во вращение через редуктор одним тяговым электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Таким образом, на каждой транспортной тележке устанавливаются два электродвигателя. Для создания синхронности вращения колесных пар от этих электродвигателей их якорные цепи соединены также последовательно. Такое конструктивное решение электромеханической системы электроподвижного состава предусматривает использование в ней электродвигателей, обладающих практически идентичными рабочими характеристиками. Под действием регулируемого источника напряжения по последовательно соединенным обмоткам возбуждения, добавочных полюсов и обмоткам якорей двух двигателей протекает общий ток, создающий электромеханические (электромагнитные в воздушном зазоре машин) моменты на их валах. Эти моменты через кинематику передаются на общую ось колёсных пар. Колёсные пары силой тяжести трамвайного вагона с помощью рельсового пути оказываются соединенными механически, т. е. в принципе должны иметь одну и ту же скорость вращения. Степень сцепления колеса с рельсом во многом обуславливается состоянием окружающей среды (дождь, снег, влажность, листва, различный мусор и т. п.). Указанные факторы

существенно снижают силы трения (фрикционного сцепления) в зоне контакта колёс с рельсами. Отличающиеся друг от друга механические характеристики при одном и том же значении тока в обмотках якорей двигателей предусматривают различие в значениях их скоростей, поэтому при уменьшенном из-за погодных условий сцеплении возможно проскальзывание одной колёсной пары тяговой тележки относительно другой. Особенно это явление будет наблюдаться при малых скоростях двигателя, поскольку в этой зоне наблюдается значительное расхождение характеристик.

Промышленное изготовление должно гарантировать идентичность рабочих характеристик всех выпускаемых электродвигателей. Однако ремонтные работы по восстановлению коллекторов, якорных обмоток, обмоток добавочных полюсов и обмоток возбуждения, выполняемые специализированными подразделениями предприятий, обслуживающих электроподвижной состав, не позволяют по разным причинам, в которые можно включить реальное качество ремонтного оборудования и квалификацию ремонтников, достичь упомянутой идентичности всех экземпляров отремонтированных электродвигателей. Неидентичность рабочих характеристик приводит к тому, что при одном и том же общем токе, одинаковых значениях электромеханических моментов этих двигателей и одинаковой скорости вращения колесных пар в силу электрического равновесия их общей якорной цепи возникает неравенство напряжений, приложенных к якорной цепи каждого двигателя:

$$U_{\text{пит сети}} = U_{\text{Я1}} + U_{\text{Я2}} = (E_{\text{Я1}} + R_{\text{оЯ1}} I_{\text{Я общ}}) + (E_{\text{Я2}} + R_{\text{оЯ2}} I_{\text{Я общ}})$$

где  $U_{\text{пит сети}}$  – напряжение на двух последовательно соединенных якорных цепях, В;

$U_{\text{я}} (U_{\text{я1}}, U_{\text{я2}})$  – напряжение на якорной цепи каждого двигателя, В;

$I_{\text{я общ}}$  – ток в цепи двух последовательно соединенных якорных обмотках, А;

$R_{\text{оя}} = R_{\text{я}} + R_{\text{возб}} + R_{\text{доп}} (R_{\text{оя1}}, R_{\text{оя2}})$  – активное сопротивление якорной цепи каждого двигателя, где  $R_{\text{я}}$  – активное сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{возб}}$  – активное сопротивление обмотки последовательного возбуждения, Ом;

$R_{\text{доп}}$  – активное сопротивление добавочных полюсов, Ом;

$E_{\text{я}} (E_{\text{я1}}, E_{\text{я2}}) = nc_e k_f$  – ЭДС каждого двигателя;

$n$  – частота вращения вала двигателя, об/мин;

$c_e$  – конструктивный коэффициент, характеризующий ЭДС двигателя;

$k_f$  – конструктивный коэффициент, характеризующий магнитный поток двигателя.

Неравенство указанных напряжений создается из-за возникшей разницы между ЭДС каждого двигателя и падением напряжения на активном сопротивлении его обмотки якоря этого двигателя, а также из-за разницы падения напряжения на активных сопротивлениях обмоток возбуждения и добавочных полюсов. Разное падение напряжения приводит к перераспределению общего напряжения питающей сети, приложенного к якорным цепям электродвигателей. На одной якорной цепи напряжение увеличивается, на другой – уменьшается. Увеличение напряжения на якорной цепи в различных режимах нагрузки (токах) неблагоприятно сказывается на процессе коммутации этого двигателя [3].

Выше была обоснована целесообразность подбора наиболее близлежащих друг к другу механических характеристик. Весьма правильно было бы ввести различие характеристик по параметру скорости в пределах инженерной погрешности, например  $\pm 5\%$ . Электромеханическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения имеет гиперболический характер и описывается выражением

$$n = \frac{U_{\text{я}} - R_{\text{оя}} I_{\text{я}}}{c_e k_f I_{\text{я}}}$$

Объектом исследования является тяговый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения типоразмера ДК263Б со следующими номинальными данными:

режим работы – S2; мощность –  $P_{\text{ном}} = 80$  кВт;

напряжение питания –  $U_{\text{я, ном}} = 275$  В;

частота вращения –  $n_{\text{ном}} = 1900$  об/мин;

максимальная частота вращения –  $n_{\text{max}} = 4060$  об/мин;

ток якоря –  $I_{\text{ном}} = 330$  А; КПД –  $\eta_{\text{ном}} = 88,5\%$ ,

момент инерции якоря –  $J_{\text{я}} = 24,27$  кг·м<sup>2</sup>.

Его естественная электромеханическая характеристика, рассчитанная аналитическим способом при температуре газообразной охлаждающей среды 20°C и предполагаемая зона расположения исследуемых характеристик, приведена на рисунке 1. Для проведения исследований, позволяющих сопоставлять электромеханические характеристики двух рассматриваемых двигателей, воспользуемся математическим моделированием как научным подходом, связанным с построением и использованием математической модели исследуемого явления, субъекта или объекта.

В частности, прибегнем к имитационному моделированию – методу исследования, при котором изучаемый объект заменяется математической моделью, с достаточной точностью описывающей реальный объект, с которым проводятся эксперименты с целью получения информации о нём, что позволяет использовать программное обеспечение *MatLab* и его среду имитационного моделирования *Simulink* [4]. При создании модели двигателя ДК263Б были использованы блоки *Simulink*, представляющие процессы основной системы создания магнитного поля с обмоткой последовательного возбуждения и дополнительной – с обмоткой независимого возбуждения, а также учитывающие влияние дополнительных полюсов и моделирующие действие момента статического сопротивления механизма на валу двигателя.

Модель момента статического сопротивления – это блок *Signal Builder*, позволяющий задавать различный характер его изменения в процессе всего расчёта. Она совместно с моделью решения уравнения движения обозначает модель электропривода. Эта обобщённая модель представлена на рисунке 2. В ней для питания двигателей применяется модель трёхфазного источника регулируемого напряжения постоянного тока, реализующего оригинальный способ получения ШИМ-управления, изложенный в [5]. Необходимость этого диктуется снижением пусковых токов и моментов двигателя в процессах пуска и торможения. Модель учитывает действие ЭДС вращения якоря двигателя за счёт введения в неё взаимоиндукции как последовательной, так и параллельной обмоток машины, что даёт возможность при исследованиях выявлять влияние на электромеханические характеристики изменения параметров этих обмоток.

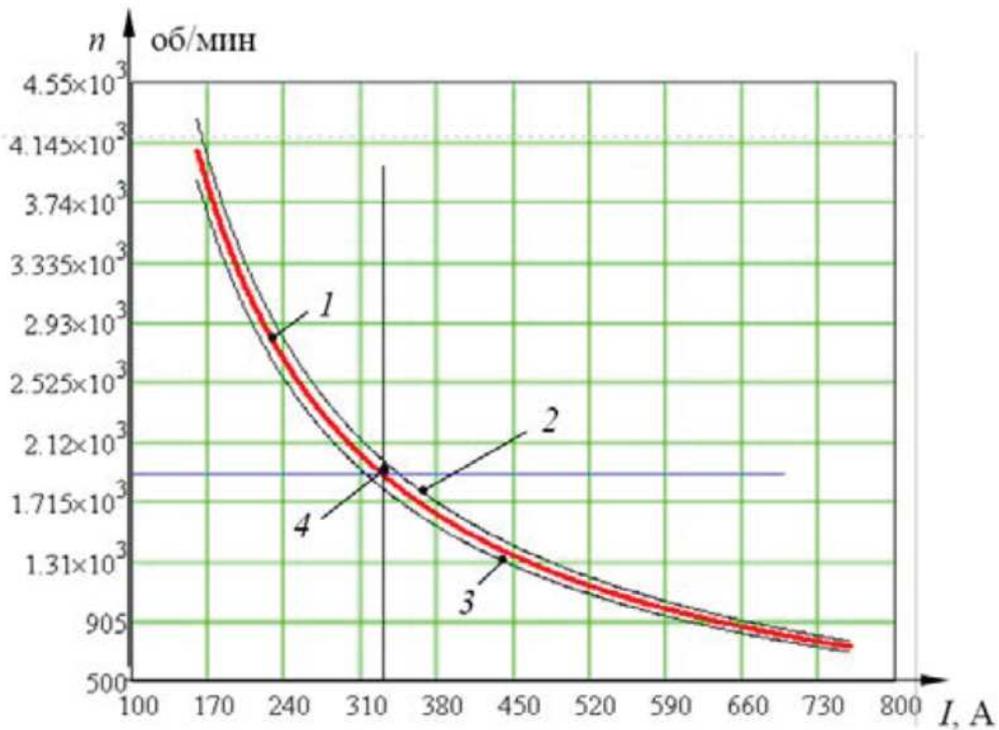


Рисунок 1 – Электромеханические характеристики двигателя ДК263Б:

1 – естественная характеристика;

2 – характеристика, соответствующая питающему напряжению  $U_{\text{я}} = 1,05U_{\text{ном}}$ ;

3 – характеристика, соответствующая питающему напряжению  $U_{\text{я}} = 0,95U_{\text{ном}}$ ;

4 – точка, соответствующая номинальным току и скорости

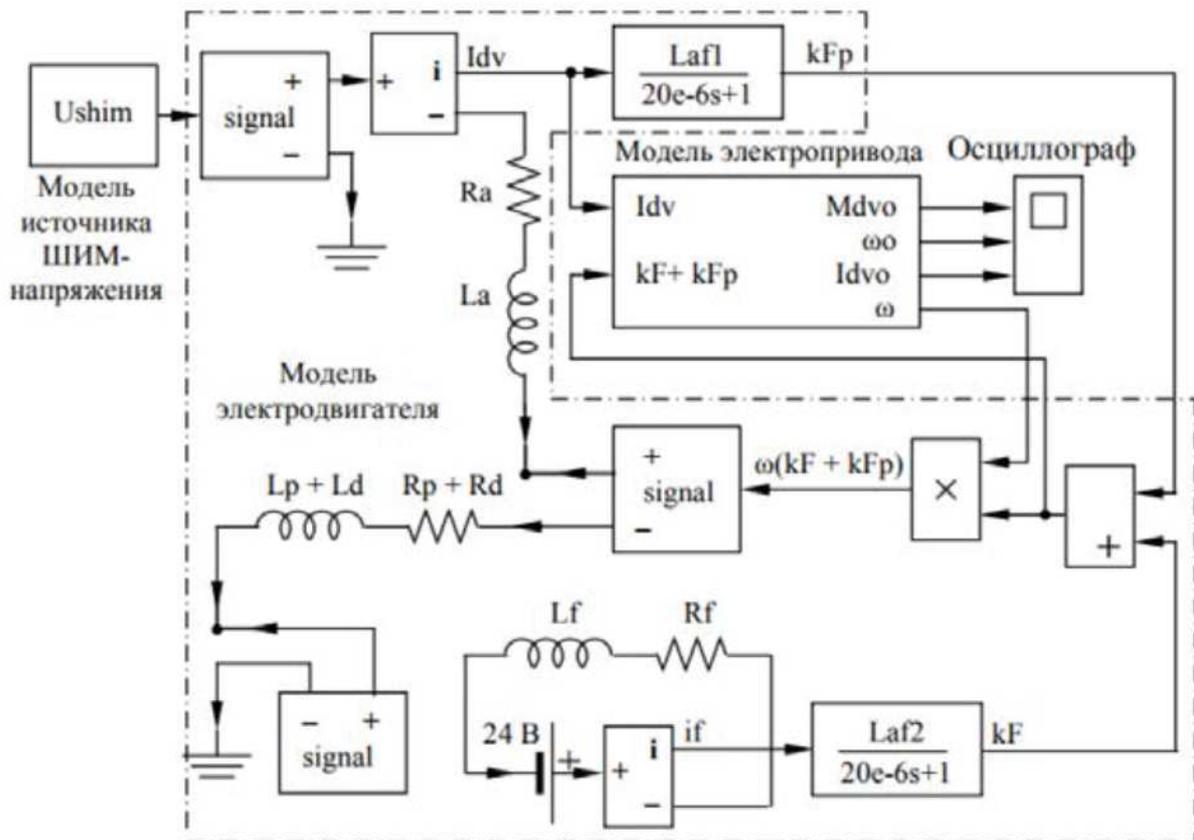


Рисунок 2 – Модель двигателя ДК263Б с моделью момента статического сопротивления

Решение вопросов, изложенных в разделе «Постановка задачи», связано с усложнением модели, состоящем в последовательном соединении обмоток якорных цепей и задании соответствующего значения напряжения на общей якорной цепи. Обобщённая модель для этого случая представлена на рисунке 3. Задание численных значений параметров для расчётов выполняется *M*-файлом, что создаёт универсальность модели для других типоразмеров электродвигателей. Вид используемого *M*-файла показан на рисунке 4. В этом *M*-файле параметры первого двигателя (1-у

motor) указаны как эталонного двигателя (параметры производителя). При проведении сравнения электромеханических характеристик акцент поставлен на сходимость скоростей двигателей, как наиболее важного параметра движения тяговой тележки. Обозначенная обобщённая модель способна проводить расчёты процессов при изменении любого параметра электродвигателя и электропривода, однако целевые исследования связаны с изменением параметров основной системы возбуждения, т. е. с изменениями параметров обмотки последовательного возбуждения.

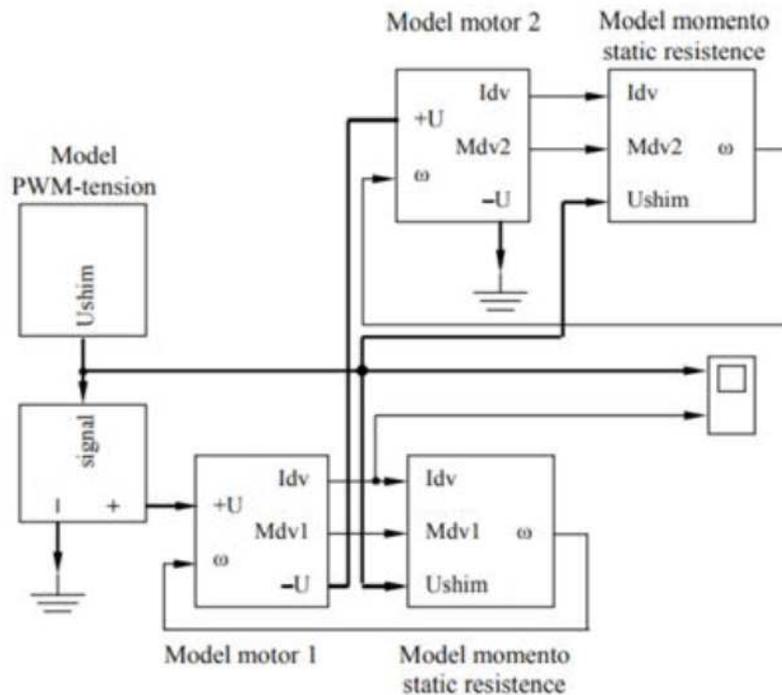


Рисунок 3 – Обобщённая модель снятия электромеханических характеристик двух исследуемых двигателей с последовательным соединением обмоток их якорей

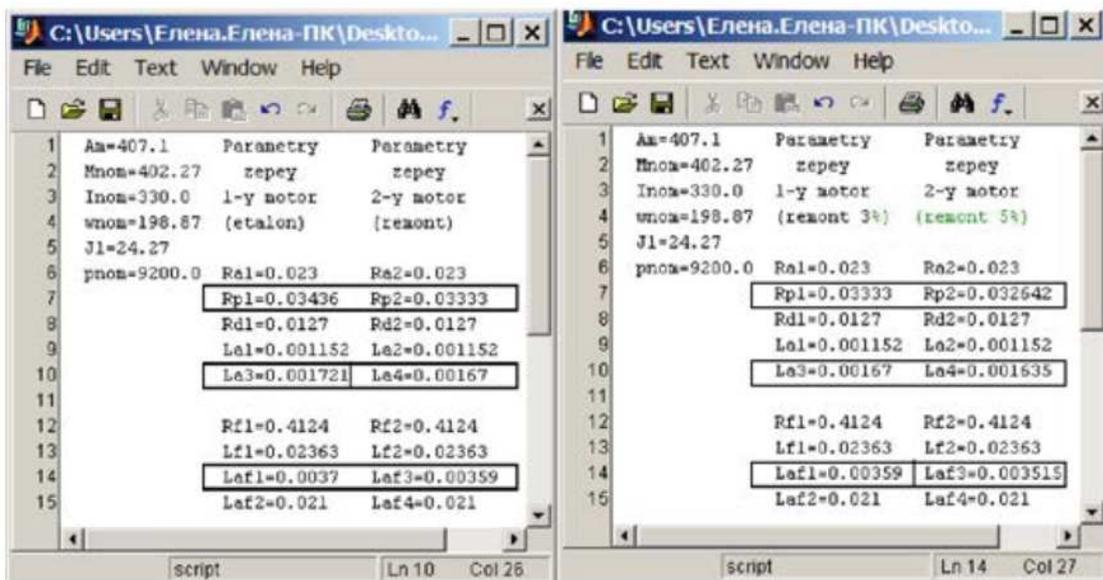


Рисунок 4 – *M*-файл для обобщённой модели: а – при сравнении эталонного двигателя с отремонтированным; б – при сравнении двух отремонтированных двигателей

Результаты расчётов в относительных единицах выводятся на экран осциллографа. В качестве примера приведены эюры электромагнитного момента  $M^* = f(t)$  и скорости вала двигателя  $\omega_1^* = f(t)$  при данных M-файла на рисунке 4, а, рисунок 5. На рисунке 5 зафиксировано время управляемого пуска от источника с ШИМ-управлением  $t_{\text{пуск}}$  при моменте статического сопротивления на валу равном  $0,1M_{\text{ном}}$ ; время работы электропривода при постоянном

средне-выпрямленном напряжении управляемого трёхфазного выпрямителя  $t_1$  и той же нагрузки; время работы с кратковременным набросом номинальной нагрузки  $t_2$ ; время работы при сбросе номинальной нагрузки  $t_3$ ; время работы при уменьшении напряжения трёхфазного выпрямителя  $t_4$ ; время свободного выбега электропривода  $t_5$ , определяемое запасённой кинетической энергией инерционных масс электропривода  $J_1 = 0,1J_{\text{дв}} = 0,1 \cdot 24,27 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

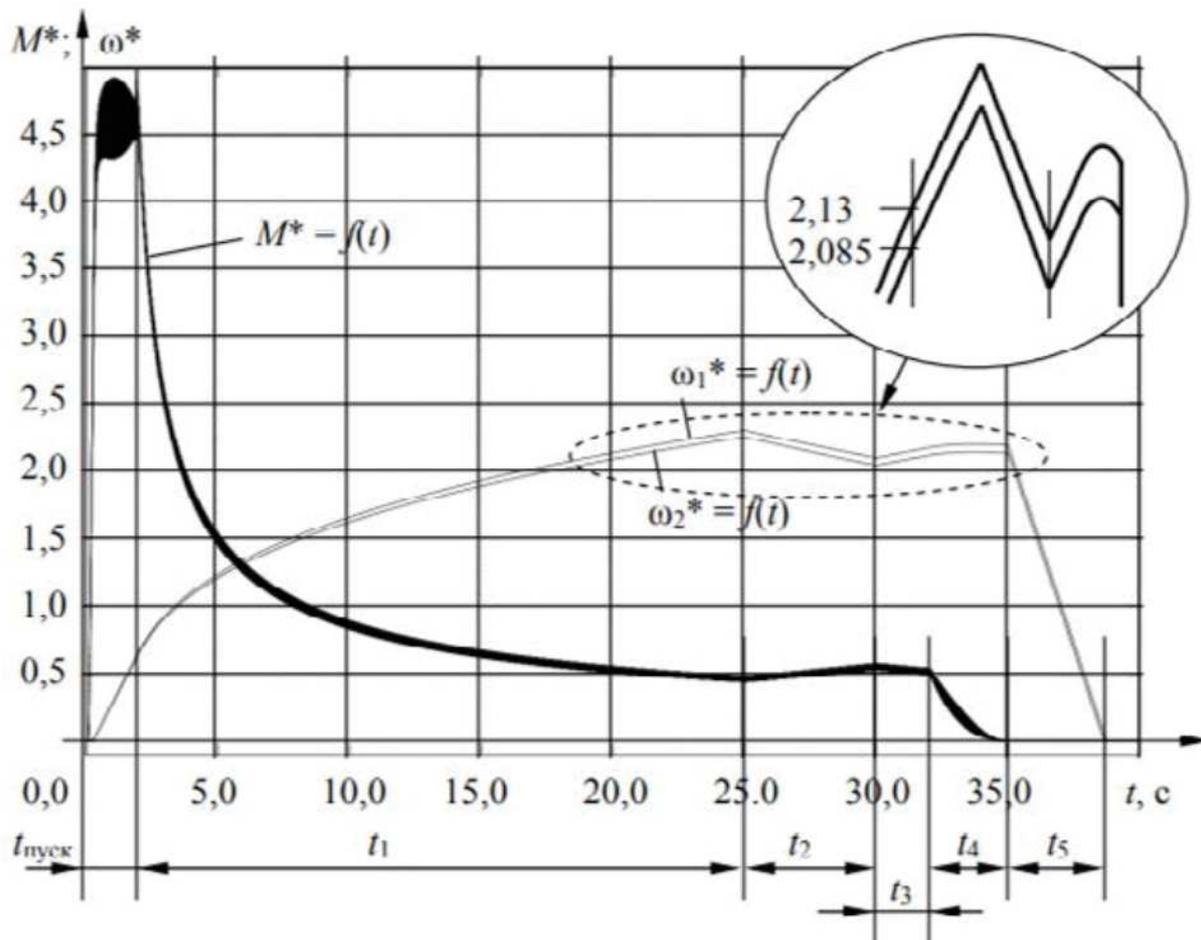


Рисунок 5 – Эюры электромагнитного момента  $M^* = f(t)$  и скорости вала двигателя  $\omega^* = f(t)$  при изменении параметров обмотки последовательного возбуждения по данным M-файла на рисунке 4, а

Анализ результатов исследований показал на приведённом примере, что электромагнитные процессы двигателя и электромеханические процессы электропривода развиваются в штатном режиме. Расхождение частот вращения валов двигателей в выбранном месте (при  $t = 20 \text{ с}$ ) составляет  $\Delta\omega^* = \omega_1^*/\omega_2^* = 2,13/2,085 = 1,0216$ . Это разногласие выливается в 2,16%. На других участках это разногласие сохраняется, особенно в зоне номинальной нагрузки  $t_2$ , что требуется для нормативной работы тяговой тележки.

Результаты расчёта указанных процессов для двух отремонтированных двигателей при данных M-файла на рисунке 4, б приведены на рисунке 6. Оценка результатов подтверждает адекватность разработанной модели, возможность определения расхождений в частотах вращения валов электродвигателей, а также подтверждает незначительное их расхождение. для приведенного результата расчёта имеем  $\Delta\omega^* = \omega_1^*/\omega_2^* = 2,155/2,1064 = 1,023$ . Это разногласие выливается в 2,3%, что является приемлемым результатом.

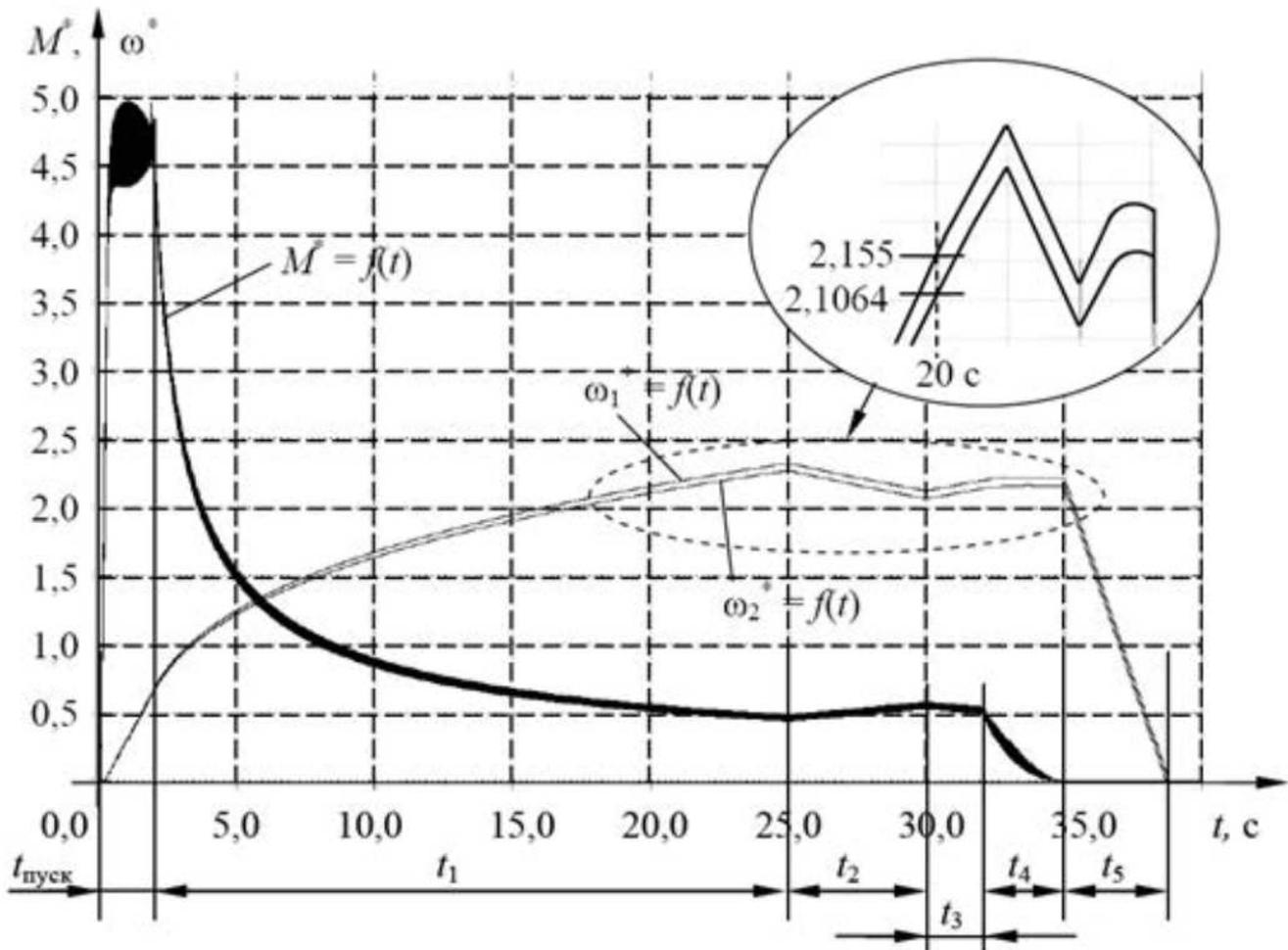


Рисунок 6 – Эпюры электромагнитного момента  $M^* = f(t)$  и скорости вала двигателя  $\omega^* = f(t)$  при изменении параметров обмотки последовательного возбуждения по данным M-файла на рисунке 4, б

**Заключение.** Разработана модель электроприводов с двумя двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, последовательно соединённых по якорной цепи. На модели выполняются исследования электромагнитных процессов двигателя и электромеханических процессов электропривода (получение их электромеханических характеристик). В расчётах один электродвигатель может приниматься как эталонный (его параметры соответствуют паспортным данным изготовителя), по отношению к которому проводится сравнение результатов моделирования. В расчёты могут быть заложены параметры двух отремонтированных двигателей. В силу детализации моделирования обмоток якорной цепи, дополнительных полюсов, последовательного и независимого возбуждения изменение любого их параметра может быть учтено

но при проведении исследований. Проведение проверочных расчётов указанных процессов подтвердило адекватность модели. Расхождение в частотах вращения валов исследуемых электродвигателей находятся в области инженерных допущений.

Результаты моделирования могут быть использованы для:

- подбора электродвигателей с близлежащими электромеханическими характеристиками для совместной работы в электроприводе тяговой тележки;
- создания базы данных отремонтированных электродвигателей с почти идентичными электромеханическими характеристиками;
- оценки качества проведенного ремонта любой из частей электродвигателя, обеспечивающей адекватное электромеханическое преобразование электроэнергии в двигателе.

*References:*

1. Vetrov YU. N., Pristavko M. V. Konstrukciya tyagovogo podvizhnogo sostava. M.: ZHeldorizdat. 2000. 316 c.
2. Rukovodstvo po ehkspluatatsii tramvajnogo vagona AKSM-60102. Minsk: Belkommunmash. 2010. 103 s.

---

3. Vol'dek A. I., Popov V. V. EHlektricheskie mashiny. Vvedenie v ehlektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory. Uchebnik dlya vuzov. SPb: Piter. 2008. 320 s.

4. CHernyh I. V. Modelirovanie ehlektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink. M.: DM K Press, 2007. 288 s.

5. Sposob polucheniya reguliruemogo napryazheniya postoyannogo toka: patent № 11021 N 02 M 7/02 / V. P. Belyaev; zayavitel' Belorus. gos. tekhnol. un-t / № a 20070326; zayavl. 29.03.2007; opubl. 15.06.09 // Aficyjny byul. / Nac. Cehntr intehlektual. ulasnasti. – 2009. – № 2. – S. 147.

*Belyaev B. P.*

## **RESEARCH MECHANICAL CHARACTERISTICS OF REPAIRED SNAKE ELECTRIC MOTORS**

*Belarusian State Technological University, Belarus*

### **Summary**

The article presents some results of the investigation of electromechanical characteristics of repaired traction motors of the size DK263B on the model developed for the traction car of the tram car in the MatLab-Simulink environment. The research allows creating a database of repaired electric motors with the purpose of their selection with nearby electromechanical characteristics for optimal joint operation in the electric drive of the traction trolley. The results can assess the repair quality of any of the parts of the electric motor that provides an adequate electromechanical conversion of electric power in the engine.

**Keywords:** electric transport, traction electric motor, modeling.