Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА имени адмирала С. О. МАКАРОВА

Институт ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Кафедра электропривода и электрооборудования береговых установок

А. В. Саушев, Е. В. Бова, Ф. А. Гельвер, А. Ю. Румянцев

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано Редакционно-издательской комиссией ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

Санкт-Петербург
Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
2019

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

УДК 629.12.04
ББК 22.172
С21

Рецензент

Самосейко В. Ф. д-р техн. наук, проф.

С21 **Саушев А. В.**
Электрический привод : учеб.-метод. пособие / А. В. Саушев, Е. В. Бова, Ф. А. Гельвер, А. Ю. Румянцев. — СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — 24 с.

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электропривод и автоматика».

Рассматриваются электромеханические свойства двигателей постоянного и переменного тока, переходные процессы в электроприводах.

Учебно-методическое пособие предназначены для студентов третьего курса, изучающих дисциплину «Электрический привод», очной и заочной форм обучения в качестве учебно-методической литературы для выполнения курсовой работы.

Рекомендовано Редакционно-издательской комиссией ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Протокол № 5 от 18 марта 2019 г.

УДК 629.12.04
ББК 22.172

© ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2019
© Коллектив авторов, 2019

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Электрический привод» является теоретическим и базовым для направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электропривод и автоматика».

Решение вопросов автоматизации производственных механизмов и установок позволит повысить экономическую и технологическую эффективность работы предприятий промышленности и транспорта. Современные автоматизированные электроприводы и машины-орудия, совершают полезную работу, направленную на обеспечение конкретного производственного процесса. Для увеличения производительности труда современных технологических установок и комплексов необходимо хорошо знать все особенности и свойства их элементов, так как без этого невозможно грамотно проектировать и эксплуатировать электрический привод.

Основной задачей курса «Электрический привод» является изучение студентами вопросов механики электропривода, электромеханических свойств электродвигателя, переходных процессов в электродвигателях и особенностей проектирования и выбора двигателей для электропривода. Успешному изучению курса в большой мере способствует самостоятельная работа студентов и выполнение ими курсовой работы «Расчет и построение механических характеристик электродвигателей постоянного и переменного тока и диаграмм их переходных режимов».

Целью курсовой работы является:

– самостоятельное изучение электромеханических свойств двигателей постоянного и переменного тока, переходных процессов в электроприводах, особенностей проектирования и выбора двигателя для приводов;

– получение навыков решения электромеханических задач в области электропривода и умение давать оценку полученных результатов расчетов.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

1.1. Расчет и построение естественных характеристик электродвигателя

Естественные электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением при пренебрежении реакцией якоря являются прямолинейными и описываются уравнениями [1, 2]:

$$n = \frac{U_{\text{ном}}}{c\Phi_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{я}}}{c\Phi_{\text{ном}}} I;$$

$$n = \frac{U_{\text{ном}}}{c\Phi_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{я}}}{kc\Phi_{\text{ном}}^{2}} M,$$

где n — частота вращения двигателя, об/мин; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети, В; $R_{\text{я}}$ — сопротивление якоря двигателя, Ом; c, k — конструктивные коэффициенты двигателя; $\Phi_{\text{ном}}$ — номинальный магнитный поток двигателя, Вб; ω — угловая скорость двигателя, рад/с.

Уравнения электрических и механических характеристик могут быть записаны и для угловой скорости, если учесть, что $\omega = 2\pi n/60$.

В связи с прямолинейностью естественные характеристики могут быть построены по двум точкам, соответствующим номинальному и пограничному (пусковому) режимам работы.

Номинальному режиму работы соответствуют точки характеристик с координатами:

$n = n_{\text{ном}}$ при $I = I_{\text{ном}}$ для электромеханической характеристики

$n = n_{\text{ном}}$ при $M = M_{\text{ном}}$ для механической характеристики.

Пограничному режиму соответствует условие, при котором $I = 0$ $(M = 0)$, отсюда следует, что пограничная частота вращения двигателя $n_{0\text{e}}$ для обеих характеристик будет равна

ФГБОУ ВО «КГУ им. адмирала С.О. Макарова»

$$n_{0e} = \frac{U_{ном}}{c\Phi_{ном}}.$$

Имея в виду, что $n_{ном} = \frac{U_{ном} - I_{ном}R_я}{c\Phi_{ном}}$,

Получим $n_{0e} = n_{ном}\frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{ном}R_я}$.

Пусковому режиму отвечает условие $n = 0$. На основании приведенных выше уравнений $n = f(I)$ и $n = f(M)$ можно записать:

$$I_{пе} = \frac{U_{ном}}{R_я},\ M_{пе} = \frac{U_{ном}k\Phi_{ном}}{R_я} = I_{пе}k\Phi_{ном}$$

Значение коэффицикнта $k\Phi_{ном}$ для последнего выражения можно определить из формулы $M_{ном} = I_{ном}k\Phi_{ном}$.

Характеристики следует строить для одного направления вращения в диапазоне от идеального холостого хода до режима стоянки под током. Для примера на рис. 1 показан вид этих характеристик.

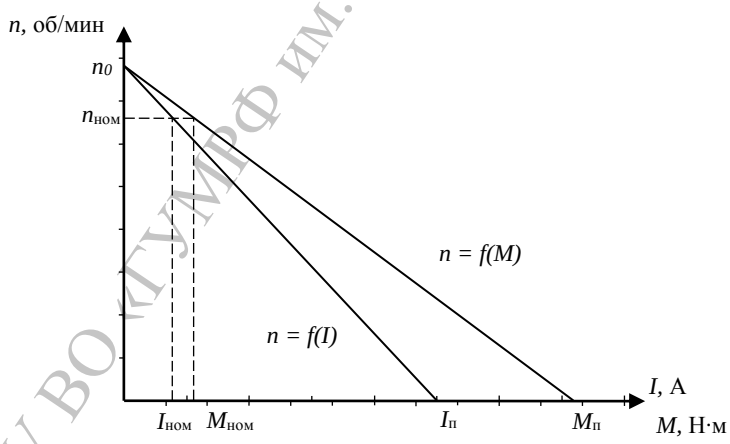

Рис. 1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова»

1.2. Расчет и построение искусственных характеристик электродвигателя

Искусственные электромеханические и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением могут быть построены аналогично построению естественных характеристик – по двум точкам характерных режимов работы, вычисленным по формулам электромеханической и механической характеристик для новых значений измененного параметра.

Для этого по формулам $n = f(I)$ и $n = f(M)$ определяют ток (момент) стоянки при $n = 0$ и пограничную частоту вращения при $I = 0$ $(M = 0)$.

Например для $U \neq U_{\text{ном}}$, получим

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} \text{ и } n_0 = \frac{U}{c\Phi_{\text{ном}}}$$

и, аналогично,

$$M_{\text{п}} = \frac{U\kappa\Phi_{\text{ном}}}{R_{\text{я}}} \text{ и } n_0 = \frac{U}{c\Phi_{\text{ном}}}.$$

Значения $c\Phi_{\text{ном}}$ и $k\Phi_{\text{ном}}$ рассчитываются для номинального режима работы электродвигателя. При одновременном изменении двух и большего числа параметров принцип расчета характеристик остается таким же.

По вычисленным граничным значениям тока и частоты вращения двигателя строятся его искусственные характеристики. Каждая из этих характеристик отвечает случаю изменения, по сравнению с номинальным режимом, только одного параметра.

Для сравнения на диаграммах искусственных характеристик обязательно следует привести естественные характеристики.

ФГБОУ ВО «КГМТУ им. адмирала С.О. Макарова»

2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1 Расчет и построение естественных характеристик двигателя

Естественная механическая характеристика может быть приближенно построена по номинальным данным с помощью формулы Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}\left(1+as_{\text{к}}\right)}{\frac{s}{s_{\text{к}}}+\frac{s_{\text{к}}}{s}+2as_{\text{к}}},$$

где M, $M_{\max}$ — соответственно текущий и максимальный моменты электродвигателя, Н·м; s, $s_{\text{к}}$ — соответственно текущее и критическое скольжение двигателя; $a = r_1 / r_2^{'}$ — постоянная двигателя.

Значения $M_{\max}$ и $s_{\text{к}}$ вычисляются по формулам:

$$M_{\max} = \frac{mU_{\text{ф}}^2}{2\omega_0\left(r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_{\text{кз}}{}^2}\right)},$$

$$s_{\text{к}} = \pm\frac{r_2^{'}}{\sqrt{r_1^2 + x_{\text{кз}}{}^2}},$$

где m — число фаз двигателя (для трехфазного двигателя $m = 3$); $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение двигателя, В; ω_0 — угловая скорость вращения магнитного поля двигателя, рад/с; r_1 — активное сопротивление фазы статора двигателя, Ом; $r_2^{'}$ — активное приведенное к статору сопротивление фазы ротора двигателя, Ом; $x_{\text{кз}}$ — индуктивное сопротивление фазы машины, Ом, которое определяется суммой первичного и вторичного приведенных реактивных сопротивлений рассеяния $x_{\text{кз}} = x_1 + x_2^{'}$;

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi f_1}{p_{\text{п}}},$$

где f_1 — частота питающего тока, Гц (для промышленного тока $f_1 = 50\,\text{Гц}$); $p_{\text{п}}$ — число пар полюсов машины.

ФГБОУ ВО «КГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

Если $p_{\text{п}}$ не задано, то оно может быть определено как целое число, полученное при делении $60 \cdot f_1$ на ближайшее большее, по сравнению с номинальной частотой вращения двигателя, число, кратное 3000.

$$x_2^{'} = \text{к}^2 x_2 \,;\; r_2^{'} = \text{к}^2 r_2$$

где r_2, x_2 — активное и индуктивное сопротивления фазы ротора до приведения, ом; к — коэффициент трансформации двигателя.

$$\text{к} = \frac{0{,}95U}{E_{2\text{ф}}},$$

где $E_{2\text{ф}}$ — фазная электродвижущая сила неподвижного ротора, В (следует иметь в виду, что в таблице исходных данных задана линейная электродвижущая сила $E_{2\text{к}}$ между кольцами ротора).

Искомая характеристика двигателя имеет вид, как показано на рис. 2.

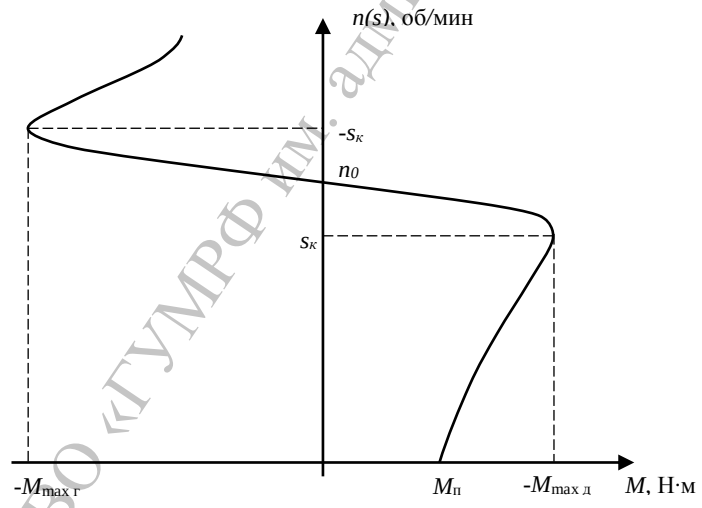

Рис. 2. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

После вспомогательных вычислений можно задаться рядом значений скольжения *s*, и основании формулы $n = n_0(1-s)$ определить по

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова»

формуле Клосса соответствующие им значения момента и построить естественную характеристику для генераторного и двигательного режимов работы асинхронного двигателя (рис. 2).

2.2. Расчет и построение искусственных характеристик двигателя

Порядок расчета искусственных механических характеристик двигателя аналогичен расчету естественных характеристик. На первом этапе вычисляются критическое скольжение и максимальный момент для заданных условий, а затем по формулам Клосса — значения текущих моментов, соответствующих выбранным значениям скольжения.

По полученным данным в осях $n(s)$ и M строятся искусственные механические характеристики. Для сравнения на диаграммах искусственных характеристик обязательно должна быть приведена естественная механическая характеристика.

3. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВЫХ ДИАГРАММ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Основной задачей расчета является определение числа и величин ступеней сопротивления пускового реостата. На практике находят применение графический и аналитический способы расчета пусковых диаграмм.

Особенности этих способов достаточно полно изложены в учебной литературе, в частности в [3,4], и поэтому здесь не приводятся.

Типовая пусковая диаграмма для линейных механических характеристик вследствие пропорциональной зависимости ($M \equiv I$) между током и моментом двигателя справедлива как для электромеханических, так и для механических характеристик.

При построении пусковой диаграммы следует стремиться к тому, чтобы выход на естественную характеристику двигателя осуществлялся при условии:

$$I = I_{\text{п}} \ \left(M = M_{\text{п}}\right).$$

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

Для выполнении этого условия следует изменить $I_{\text{п}}(M_{\text{п}})$ или $I_{\text{пер}}(M_{\text{пер}})$ в допустимых пределах и вновь построить пусковую диаграмму.

Из диаграммы видно, что чем меньше разность между значениями $I_{\text{п}}(M_{\text{п}})$ и $I_{\text{пер}}(M_{\text{пер}})$ при том же $I_{\text{п}}(M_{\text{п}})$, тем больше ступеней имеет реостат и пуск будет не только плавней, но и произойдет за более короткое время за счет увеличения среднего избыточного момента. Большое число ступеней пускового реостата приводит, однако, к усложнению схемы и увеличению ее стоимости.

При графическом способе расчета целесообразно масштаб сопротивления m_2 определить при пусковой нагрузке по рис. 3.

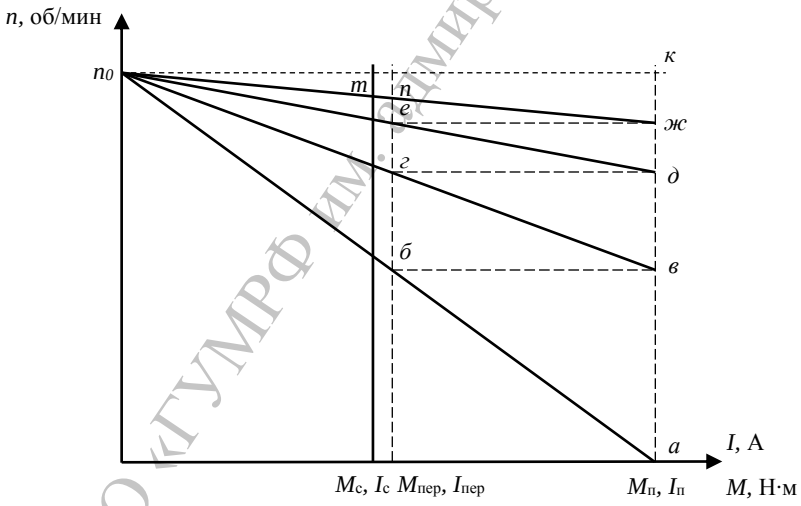

Рис. 3. Пусковая диаграмма для линейных механических характеристик двигателя

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

При этом $$m_2 = \frac{r_2'}{l_{\text{жк}}},$$

$$R_{\text{д}i} = m_2 l_i,$$

где l_i — значение длины отрезка для i -ой ступени пускового резистора, мм.

При аналитическом способе расчета число ступеней сопротивления можно вычислить по формуле

$$n = \frac{\ln R_{\text{п}} / r_2'}{\ln \lambda},$$

где

$$\lambda = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{пер}}}.$$

Значения сопротивлений отдельных ступеней пускового резистора будут равны:

$$R_{\text{д}1} = r_2'(\lambda - 1);$$

$$R_{\text{д}2} = r_2'\lambda(\lambda - 1);$$

……;

$$R_{\text{д}i} = r_{2\,i}'\lambda^{i-1}(\lambda - 1);$$

……;

$$R_{\text{д}n} = r_2'\lambda^{n-1}(\lambda - 1).$$

Полное приведенное сопротивление цепи фазы ротора при пуске может быть рассчитано по вытекающему из пусковой диаграммы выражению

$$R_{\text{п}} = \frac{r_2' M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}} M_{\text{п}}}.$$

Результаты графического и аналитического определения числа и величин ступеней сопротивления пускового реостата не должны отличаться более, чем на (5–10) %.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

4. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ПУСКЕ

Анализ переходных режимов предусматривает определение продолжительности, а также характера изменения основных параметров (частоты вращения, момента на валу) во времени. Для наглядности изменяющиеся параметры изображаются в виде временных диаграмм или графиков переходных режимов.

По условию данного пункта задания анализу подлежит механический переходный режим при прямолинейно убывающем избыточном моменте в случае ступенчатого реостатного пуска двигателя в ход. Характер частоты вращения и момент на валу двигателя при этом можно установить по формулам [1, 3]:

$$n_i = n_{yi}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{мi}}}\right) + n_{начi}e^{-\frac{t}{T_{мi}}};$$

$$M_i = M_{yi}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{мi}}}\right) + M_{начi}e^{-\frac{t}{T_{мi}}},$$

где n_i — частота вращения на i -ой ступени пускового резистора, об/мин; M_i — момента на валу двигателя на i -ой ступени пускового резистора, Нм; $T_{мi}$ — механическая постоянная времени на i -ой ступени пускового резистора, с; t — время, в которое определяется значение переменной, с.

Как известно: $T_{мi} = \dfrac{Jn_{yi}}{9{,}55M_{икi}} = \dfrac{J\left(n_{конi} - n_{начi}\right)}{9{,}55\left(M_{иначi} - M_{иконi}\right)}$,

где J — момент инерции системы, кг·м^2; $M_{иначi}$, $M_{иконi}$ — избыточный момент в начале и конце переходного процесса разгона двигателя по i -ой ступени пускового резистора, Н·м; $M_{икi}$ — критический избыточный момент на i -ой ступени пускового резистора, Н·м.

В приведенных формулах индекс i означает порядковый номер характеристики (ступени), для которой рассчитываются значения переменных.

ФГБОУВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

Для всех ступеней пусковой диаграммы одними и теми же будут:

$M_{yi} = M_{ном}$; $M_{начi} = M_{п}$; $M_{иначi} = M_{п} - M_{с} = M_{п} - M_{ном}$;

$M_{иконi} = M_{пер} - M_{с} = M_{пр} - M_{ном}$.

В то же время будут другими значениями n_{yi}, $n_{конi}$, $n_{начi}$, а значит, и $T_{мi}$. В процессе расчета для каждой из характеристик пусковой диаграммы устанавливается диапазон изменения частоты вращения, а также избыточных моментов, и определяется механическая постоянная времени.

Результаты вычислений для каждой ступени целесообразно свести в таблицу.

Далее вычисляется время разгона на данной характеристике по формуле $t_i = \dfrac{J}{9{,}55} \dfrac{n_{конi} - n_{начi}}{M_{начi} - M_{иконi}} \ln \dfrac{M_{иначi}}{M_{иконi}}$.

Для каждого интервала времени разгона двигателя по i-ой ступени строится график изменения частоты вращения и момента двигателя в переходном режиме $n = f(t)$ и $M = f(t)$.

График переходного процесса для совмещения масштабов целесообразно строить на общем листе с пусковой диаграммой.

На рис. 4 в качестве примера приведены пусковая диаграмма и график переходного режима для ступенчатого реостатного разгона двигателя.

Продолжительность ступенчатого разгона двигателя от неподвижного состояния до конечной частоты вращения на естественной характеристике $n_{коне}$ аналитически можно определить по следующей формуле:

$$t = \frac{J}{9{,}55} \frac{n_{кон}}{M_{инач} - M_{икон}} \ln \frac{M_{инач}}{M_{икон}} \cong \frac{J}{9{,}55} \frac{n_{ном}}{M_{инач} - M_{икон}} \ln \frac{M_{инач}}{M_{икон}},$$

где $n_{ном}$ — установившаяся частота вращения двигателя на естественной характеристике (номинальная частота вращения).

Полное время разгона, взятое из графика переходного процесса и рассчитанное аналитически, не должны отличаться более чем на (5–10) %.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

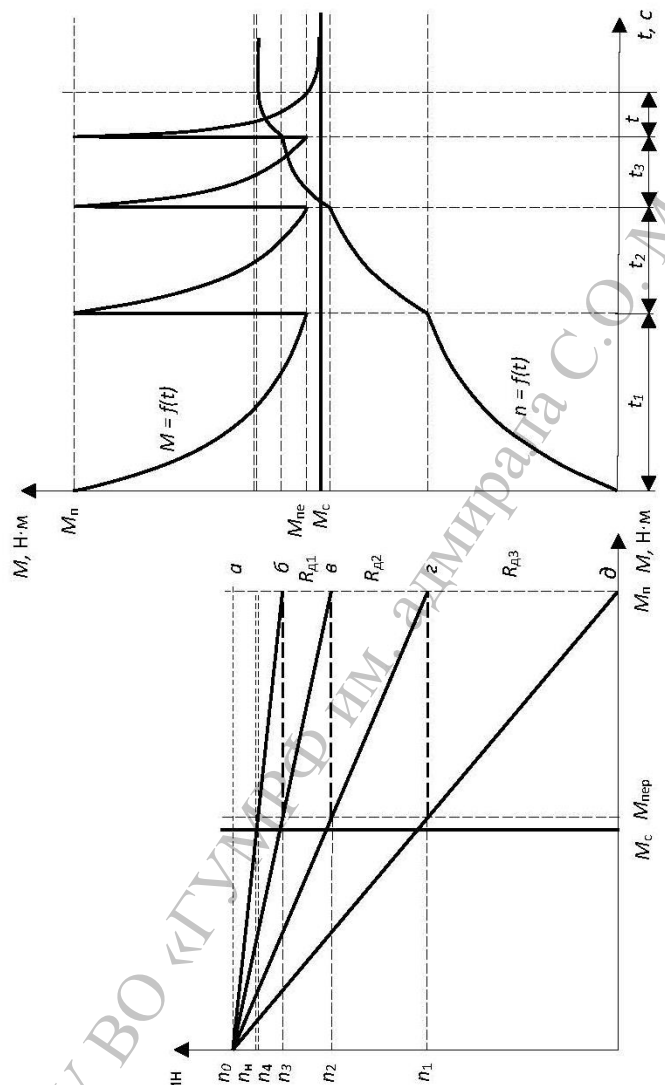

Рис. 4. Пусковая диаграмма и график механического переходного процесса при прямолинейном изменении момента

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

5. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗГОНЕ ДВИГАТЕЛЯ ПО ЕСТЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Анализ электромеханических переходных режимов из-за необходимости учета механической и электромагнитной инерций значительно труднее рассмотренных выше механических переходных режимов.

Для электропривода постоянного тока при условии постоянства потока и индуктивности обмоток, а также при пренебрежении потерями на вихревые токи и гистерезис, характер переходного процесса можно установить аналитически. При разгоне от неподвижного состояния привода (как предусмотрено заданием) переходный процесс отличается от процесса при изменении частоты вращения и состоит из двух частей. В первой части (двигатель неподвижен), происходит чисто электромагнитный переходный процесс изменения тока и момента до тех пор, пока электромагнитный момент не превысит момент сопротивления от рабочей машины. В этот период времени ток и момент можно определить по формулам [3]:

$$I = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_э}}\right),\ M = Ik\Phi = Ik_м .$$

Во второй части (с началом вращения) переходный процесс будет электромеханическим, а формулы:

$$n = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + n_{ном};$$

$$I = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} + I_{ном};$$

$$M = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + M_{ном}.$$

В приведенных формулах p_1 и p_2 (корни характеристических уравнений) равны

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_э} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_э^2} - \frac{1}{T_э T_м}},$$

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

где $T_{\text{м}} = \dfrac{Jn_{\text{у}}}{9{,}55M_{\text{ик}}}$ — механическая постоянная времени машинного устройства; $T_{\text{э}} = L/R$ — электромагнитная постоянная времени якоря машины.

Индуктивность цепи якоря приближенно может быть вычислена по формуле

$$L = \beta \frac{U}{p_{\text{п}} \omega_{\text{ном}} I_{\text{ном}}} = 9{,}55\beta \frac{U}{p_{\text{п}} n_{\text{ном}} I_{\text{ном}}},$$

где β = 0,6…0,25 (нижний предел для компенсированных машин);

$p_{\text{п}}$ — число пар полюсов.

В тех же формулах A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2 представляют собой постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий переходного режима.

В общем случае при $t = 0$

$$n = n_{\text{нач}},\ I = I_{\text{нач}},\ M = M_{\text{нач}}.$$

Для второй части переходного режима ($M > M_{\text{с}}$) можно принять

$$n_{\text{нач}} = 0,\ I_{\text{нач}} = I_{\text{ном}}\ \left(M_{\text{нач}} = M_{\text{ном}}\right),$$
$$n'_{\text{нач}} = n_{\text{ном}}, I_{\text{нач}} = I_{\text{п}}\ \left(M'_{\text{нач}} = M_{\text{п}}\right).$$

В этом случае коэффициенты будут

$$A_1 = \frac{n_{\text{ном}} p_2}{p_1 - p_2};\ A_2 = -\frac{n_{\text{ном}} p_1}{p_1 - p_2};$$

$$B_1 = \frac{I_{\text{п}} - I_{\text{ном}}}{T_{\text{э}}\left(p_1 - p_2\right)};\ B_2 = -\frac{I_{\text{п}} - I_{\text{ном}}}{T_{\text{э}}\left(p_1 - p_2\right)};$$

$$C_1 = \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{ном}}}{T_{\text{э}}\left(p_1 - p_2\right)};\ C_2 = -\frac{M_{\text{п}} - M_{\text{ном}}}{T_{\text{э}}\left(p_1 - p_2\right)}.$$

В случае комплексных корней характеристических уравнений расчет переходных процессов может быть выполнен по формулам, полученным с помощью преобразований Эйлера, а именно:

$$n = Ae^{-\frac{t}{2T_{\text{э}}}} \sin\left(\nu t + \phi\right) + n_{\text{ном}};$$

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

$$I = Be^{-\frac{t}{2T_э}} \sin\left(\nu t + \psi\right) + I_{ном};\ M = Ce^{-\frac{t}{2T_э}} \sin\left(\nu t + \gamma\right) + M_{ном},$$

где

$$\nu = \sqrt{\frac{1}{T_э T_м} - \frac{1}{4T_э^2}};$$

$$A = 2j\sqrt{-A_1 A_2} = \frac{n_{ном}}{\nu\sqrt{T_э T_м}};\ B = 2j\sqrt{-B_1 B_2} = \frac{I_п - I_{ном}}{\nu T_э};$$

$$C = 2j\sqrt{-C_1 C_2} = \frac{M_п - M_{ном}}{\nu T_э};$$

$$\phi = \arcsin\frac{A_1 + A_2}{2j\sqrt{-A_1 A_2}} = \arcsin\left(-\nu\sqrt{T_э T_м}\right);\ \psi = 0 \text{ и } \gamma = 0.$$

Расчет переходных режимов при вещественных отрицательных корнях можно выполнить по преобразованным формулам:

$$n = Ae^{-\frac{t}{2T_э}} sh\left(\varepsilon t + \phi\right) + n_{ном};$$

$$I = Be^{-\frac{t}{2T_э}} sh\left(\varepsilon t + \psi\right) + I_{ном};$$

$$M = Ce^{-\frac{t}{2T_э}} sh\left(\varepsilon t + \gamma\right) + M_{ном};$$

где

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{4T_э} - \frac{1}{T_э T_м}};\ A = 2\sqrt{-A_1 A_2} = \frac{n_{ном}}{\varepsilon\sqrt{T_э T_м}};$$

$$B = 2\sqrt{-B_1 B_2} = \frac{I_п - I_{ном}}{\varepsilon T_э};$$

$$C = 2\sqrt{-C_1 C_2} = \frac{M_п - M_{ном}}{\varepsilon T_э};\ \phi = arcsh\frac{A_1 + A_2}{2\sqrt{-A_1 A_2}} = arcsh\left(-\varepsilon\sqrt{T_э T_м}\right)$$

$$\psi = 0 \text{ и } \gamma = 0.$$

На рис. 5 в качестве примера приведены механические характеристики и диаграмма электромеханического переходного режима для рассмотренных условий.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

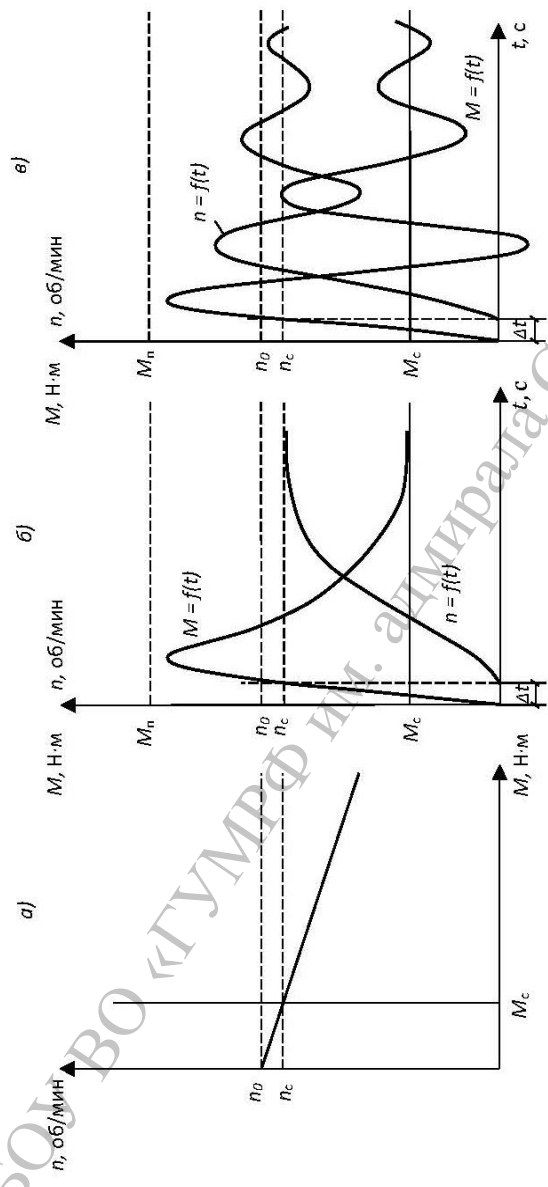

Рис. 5. Характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением: *а*) механическая характеристика; *б*) характеристика апериодического и *в*) колебательного электромеханических процессов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Онищенко Г. Б.* Электрический привод: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Г. Б. Онищенко. — 2-е изд., стереотип. — М.: Издательский центр «Академия», 2008. — 288 с.
2. *Ильинский Н. Ф.* Основы электропривода: учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. — 224 с.
3. *Шорин В. П.* Электрический привод и теория электрического привода: учебное пособие / В. П. Шорин. — СПб. ГУВК. — СПб.: СПбГУВК, 2003. — 305 с.
4. *Фролов Ю. М.* Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. — СПб.; — М.; Краснодар: Лань, 2012. — 366 с.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова»

Приложение 1

Краново-металлургические двигатели постоянного тока параллельного возбуждения, ПВ = 40 %

№ п/п	Тип двигателя	P, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$I_я$, А	$R_я$, Ом	J, кг·м^2	Исполнение
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Д-12	2,4	1230	14	1,13	0,05	Тихоходные $U_{ном}$=220 В
2	Д-21	3,6	1080	20	0,66	0,12	
3	Д-22	4,8	1150	26	0,37	0,155	
4	Д-31	6,8	880	37	0,332	0,3	
5	Д-32	9,5	800	51	0,189	0,42	
6	Д-41	13	720	69	0,106	0,8	
7	Д-806	16	710	84	0,067	1,0	
8	Д-808	22	630	112	0,034	2,0	
9	Д-810	29	600	148	0,0233	3,6	
10	Д-812	38	565	192	0,0140	7,0	
11	Д-814	55	560	280	0,008	10,25	
12	Д-816	70	535	350	0,0055	16,25	
13	Д-818	83	470	415	0,0039	22,5	
14	Д-21	4,4	1500	24,5	0,3560	0,12	Быстроходные $U_{ном}$=220 В
15	Д-22	6,5	1570	34	0,202	0,15	
16	Д-31	9,5	1420	50,5	0,137	0,3	
17	Д-32	13	1240	68	0,086	0,42	
18	Д-41	17,5	1160	90,5	0,043	0,8	
19	Д-806	21	1060	110	0,031	1,0	
20	Д-808	26	825	134	0,0186	2,0	
21	Д-21	3,1	1300	9,5	2,4	0,12	Тихоходные $U_{ном}$=440 В
22	Д-31	5,2	910	14,5	1,75	0,3	
23	Д-41	12,5	720	34	0,468	0,8	
24	Д-808	22	630	56	0,136	2,0	
25	Д-810	29	600	74	0,094	3,6	
26	Д-812	36	570	92	0,065	7,0	
27	Д-814	55	560	138	0,0325	10,24	
28	Д-816	70	540	175	0,022	16,25	
29	Д-22	5,6	1550	15,5	1,2	0,15	$U_{ном}$=440 В

ФГБОУВО «ЛГУ им. им. академика В.П. Макарова»

Приложение 2

Варианты условий работы для построения искусственных электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока

№ варианта	№ характеристики	Параметры		
		U	R	Ф
1 – 6	1	$U_{ном}$	$R_я$	$0{,}9\,Ф_{ном}$
	2	$U_{ном}$	$1{,}5\,R_я$	$Ф_{ном}$
	3	$1{,}1\,U_{ном}$	$R_я$	$Ф_{ном}$
7 – 12	1	$U_{ном}$	$R_я$	$0{,}8\,Ф_{ном}$
	2	$U_{ном}$	$2{,}0\,R_я$	$Ф_{ном}$
	3	$1{,}2\,U_{ном}$	$R_я$	$Ф_{ном}$
13 – 18	1	$U_{ном}$	$R_я$	$0{,}7\,Ф_{ном}$
	2	$U_{ном}$	$2{,}5\,R_я$	$Ф_{ном}$
	3	$1{,}3\,U_{ном}$	$R_я$	$Ф_{ном}$
19 – 24	1	$U_{ном}$	$R_я$	$0{,}6\,Ф_{ном}$
	2	$U_{ном}$	$3{,}0\,R_я$	$Ф_{ном}$
	3	$1{,}4\,U_{ном}$	$R_я$	$Ф_{ном}$
25 – 29	1	$U_{ном}$	$R_я$	$0{,}5\,Ф_{ном}$
	2	$U_{ном}$	$3{,}5\,R_я$	$Ф_{ном}$
	3	$1{,}5\,U_{ном}$	$R_я$	$Ф_{ном}$

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова»

Приложение 3

Краново-металлургические двигатели переменного тока с фазным ротором 380 В, 50 Гц, ПВ = 40 %

№ п/п	Тип двигателя	P, кВт	n, об/мин	Статор		Ротор			
				r_1, Ом	x_1, Ом	r_2, Ом	x_2, Ом	$E_{2к}$, В	J, кг·м^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4MTH112L6	2,2	890	2,97	3,11	0,565	0,113	144	0,035
2	4MTH112LB6	3,7	900	1,55	1,92	0,462	0,217	190	0,045
3	4MTH132L6	5,5	915	1,07	1,3	0,306	0,264	213	0,09
4	4MTH132LB6	7,5	935	0,68	0,98	0,3	0,292	242	0,11
5	4MTH160L6	11	960	0,35	0,59	0,072	0,054	179	0,23
6	4MTH160LB6	15	930	0,236	0,42	0,073	0,080	213	0,28
7	4MTH200L	22	935	0,235	0,27	0,054	0,098	235	0,57
8	4MTH200LB6	30	935	0,132	0,33	0,04	0,089	235	0,68
9	4MTH225M6	37	955	0,066	0,22	0,049	0,147	295	0,9
10	4MTH225L6	55	970	0,039	0,13	0,029	0,135	290	1,02
11	4MTH280S6	75	970	0,023	0,08	0,019	0,066	270	3,3
12	4MTH280M6	110	975	0,025	1,08	0,024	0,13	420	4,1
13	4MT160L8	7,5	695	0,48	0,67	0,095	0,272	227	0,23
14	4MT160LB8	11	705	0,265	0,51	0,096	0,083	185	0,29
15	4MT200L8	15	710	0,235	0,31	0,082	0,083	206	0,62
16	4MT200LB8	22	715	0,14	0,32	0,068	0,114	248	0,74
17	4MTH225M8	30	720	0,14	0,27	0,056	0,154	252	1,07
18	4MTH225L8	37	725	0,1	0,2	0,049	0,154	302	1,43
19	4MTH280S8	55	720	0,049	0,19	0,017	0,054	196	4,3
20	4MTH280M8	75	725	0,03	0,12	0,019	0,072	277	5,2
21	4MTH280L8	90	730	0,023	0,1	0,023	0,094	355	6,3
22	4MTH280S10	45	576	0,061	0,19	0,017	0,017	181	4,3
23	4MTH280M10	60	580	0,047	0,17	0,020	0,043	239	5,2
24	4MTH280L10	75	582	0,031	0,12	0,024	0,092	308	6,3
25	4MTH355S10	110	584	0,019	0,08	0,012	0,044	277	10,2
26	4MTH355M10	132	585	0,014	0,06	0,014	0,075	330	12,8
27	4MTH355L10	160	586	0,012	0,05	0,015	0,137	414	15
28	4MTH400S10	100	586	0,02	0,09	0,013	0,05	272	10,4
29	4MTH3400M10	125	587	0,018	0,08	0,015	0,09	280	12,7

ФГБОУ ВО «УГМТУ» Кафедра ЭО (Макарова)

Приложение 4

Варианты условий работы для построения искусственных электромеханических и механических характеристик двигателя переменного тока

№ варианта	№ характеристики	Параметры				
		U	r_1	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
1 – 6	1	$0{,}9U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	2	$U_{ном}$	$1{,}5r_1$	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	3	$U_{ном}$	r_1	$1{,}5x_{кз}$	f_1	$p_п$
	4	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	$1{,}5f_1$	$p_п$
	5	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$2p_п$
7 – 12	1	$0{,}8U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	2	$U_{ном}$	$2{,}0r_1$	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	3	$U_{ном}$	r_1	$2{,}0x_{кз}$	f_1	$p_п$
	4	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	$2{,}0f_1$	$p_п$
	5	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$3p_п$
13 – 18	1	$0{,}7U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	2	$U_{ном}$	$2{,}2r_1$	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	3	$U_{ном}$	r_1	$2{,}2x_{кз}$	f_1	$p_п$
	4	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	$2{,}2f_1$	$p_п$
	5	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$4p_п$
19 – 24	1	$0{,}6U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	2	$U_{ном}$	$2{,}5r_1$	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	3	$U_{ном}$	r_1	$2{,}5x_{кз}$	f_1	$p_п$
	4	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	$2{,}5f_1$	$p_п$
	5	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$5p_п$
25 – 29	1	$0{,}5U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	2	$U_{ном}$	$3{,}0r_1$	$x_{кз}$	f_1	$p_п$
	3	$U_{ном}$	r_1	$3{,}0x_{кз}$	f_1	$p_п$
	4	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	$3{,}0f_1$	$p_п$
	5	$U_{ном}$	r_1	$x_{кз}$	f_1	$6p_п$

ФГБОУ ВО «КГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением..... 4
1.1. Расчет и построение естественных характеристик электродвигателя 4
1.2. Расчет и построение искусственных характеристик электродвигателя 6
2. Электромеханические и механические характеристики асинхронного двигателя 7
2.1. Расчет и построение естественных характеристик двигателя..... 7
2.2. Расчет и построение искусственных характеристик двигателя..... 9
3. Расчет и построение пусковых диаграмм двигателей с прямолинейными характеристиками 9
4. Расчет и построение графиков механического переходного режима асинхронного двигателя при ступенчатом пуске 12
5. Расчет и построение графиков электромеханического переходного режима двигателя постоянного тока при разгоне двигателя по естественной характеристике 15
Библиографический список 19
Приложение 20
Оглавление 24

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова»