

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ АВТОКОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР — ДВИГАТЕЛЬ С МАШИНАМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

И. С. АВРААМОВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В современной технике используется система генератор—двигатель с машинами последовательного возбуждения (рис. 1), особенно в маломощных приводах металлорежущих станков, а также в электроприводах самолетных агрегатов [1, 12]. Положительные качества системы — широкий диапазон регулирования скорости, отсутствие возбудителя

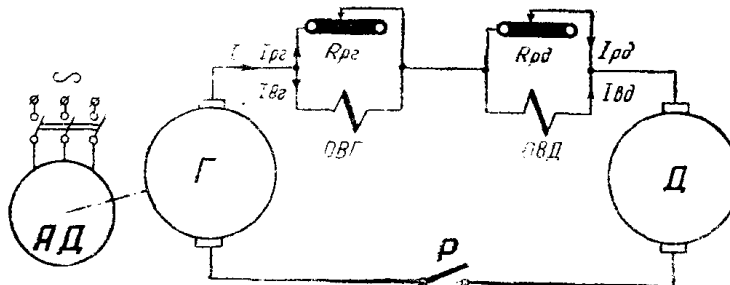


Рис. 1.

и чрезвычайная простота и надежность схемы управления — сделали ее довольно распространенной. Однако мощность применяемых машин ограничивается большими потерями в регулировочных реостатах, а также возможностью возникновения колебаний тока и скорости двигателя. Возникновение колебаний в мощных приводах может привести к тяжелым авариям.

В настоящее время в литературе опубликованы немногочисленные работы, касающиеся системы генератор—двигатель с машинами последовательного возбуждения [1, 2, 3, 4, 5, 6, 12]. В основном в этих работах рассматриваются статические механические характеристики системы. Вопрос же исследования колебаний освещен совершенно недостаточно. В некоторых работах указывается только возможность возникновения колебаний без всякой попытки анализа их. Только в работе [7] приведен математический анализ колебаний; при этом система рассматривалась как линейная, а колебания как гармонические, что совершенно неудовлетворительно объясняет механизм возникновения их. В работе [1] была сделана первая попытка исследовать систему

как нелинейную, в ней дан аналитический метод исследования статических механических характеристик, но рассчитанные характеристики в области малых токов имеют большое расхождение с опытными, что не позволяет правильно судить о тех процессах, которые происходят в машинах при малых токах.

В настоящей работе сделана попытка исследовать возникающие в данной системе колебания с учетом нелинейных параметров, определить характер колебаний и выяснить условия устойчивой работы данной системы. Кроме того, исследование нелинейных систем является в настоящее время исключительно важной задачей. В статье члена корр. Акад. наук СССР проф. Л. Р. Неймана [8] говорится: „Значительно менее разработанной и вместе с тем приобретающей в настоящее время исключительно большое значение является теория нелинейных электрических и магнитных цепей, параметры которых резко зависят от интенсивности происходящих в них процессов . . . Если ранее нелинейность учитывалась в теории цепей как осложняющий фактор, то теперь по возможности полная разработка теории нелинейных цепей приобретает первостепенное значение в электроавтоматике, телемеханике, электроизмерительной технике, радиотехнике, электроэнергетике и др. областях“.

Исследование колебаний электромеханической системы со многими нелинейностями представляет интерес и с точки зрения идеи колебательной взаимопомощи различных областей физики и техники. В силу того, что „учение о колебаниях объединяет физические явления, одинаковые по форме управляющих ими закономерностей“ [9], исследования колебаний в нелинейной электромеханической системе могут быть использованы в других областях физики и техники.

В настоящей работе исследуется электромеханическая система с нелинейной электродинамической емкостью, нелинейными характеристиками намагничивания машин и с нелинейной зависимостью падения напряжения в контакте между коллектором и щетками.

Статические механические характеристики

Уравнение статической скоростной характеристики может быть получено из уравнения электрического равновесия системы

$$e_z = IR + e_{\partial\partial} + L(I) \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

где

$e_z = f(I)$ — э. д. с. генератора — нелинейная функция тока в силу насыщения генератора;

$IR = F(I)$ — падение напряжения в активном сопротивлении силовой цепи — нелинейная функция тока в силу нелинейности сопротивления в переходном слое „щетка—коллектор“;

$L(I)$ — общий коэффициент самоиндукции системы;

I — ток, протекающий по силовой цепи;

$e_{\partial\partial} = c'_{e_{\partial\partial}} \cdot \Phi_{\partial\partial} \cdot n$ — противо э. д. с. двигателя, равная произведению коэффициента $c'_{e_{\partial\partial}}$, зависящего от конструктивных данных машины, магнитного потока и скорости двигателя.

Для статического режима следует положить в (1) $L(I) \frac{dI}{dt} = 0$.

Подставляя в (1) значение $e_{\partial\partial}$, полагая $L(I) \frac{dI}{dt} = 0$ и решая полу-

ченное уравнение относительно n , получим окончательно уравнение статической скоростной характеристики

$$n = \frac{e_s - IR}{c'_{\epsilon_{\partial\delta}} \Phi_{\partial\delta}} = \frac{e_{\partial\delta}}{\left(\frac{E}{n}\right)} = \frac{\psi(I)}{\varphi(I)} \quad (2)$$

В числителе $e_s - IR$ или $f(I) - F(I) = \psi(I)$ — нелинейная характеристика противо э. д. с. двигателя. В знаменателе — величина „вольт на оборот“. Характеристика $\frac{E}{n} = \varphi(I)$ представляет собой кривую намагничивания двигателя. Для построения скоростной характе-

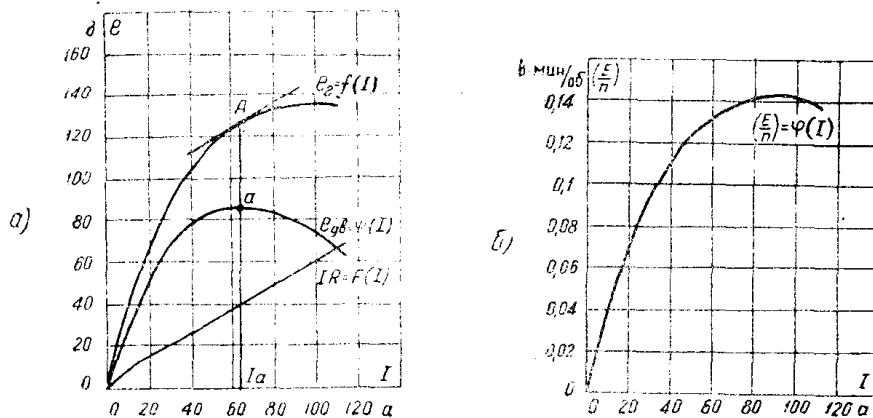


Рис. 2.

ристики необходимо знать зависимости $e_s = f(I)$, $\left(\frac{E}{n}\right) = \varphi(I)$ и $IR = F(I)$, которые могут быть получены из опыта (рис. 2 а, 2 б). Зависимость $e_{\partial\delta} = \psi(I)$ получается в результате вычитания ординат характеристики $IR = F(I)$ из ординат характеристики $e_s = f(I)$, взятых при одинаковых токах.

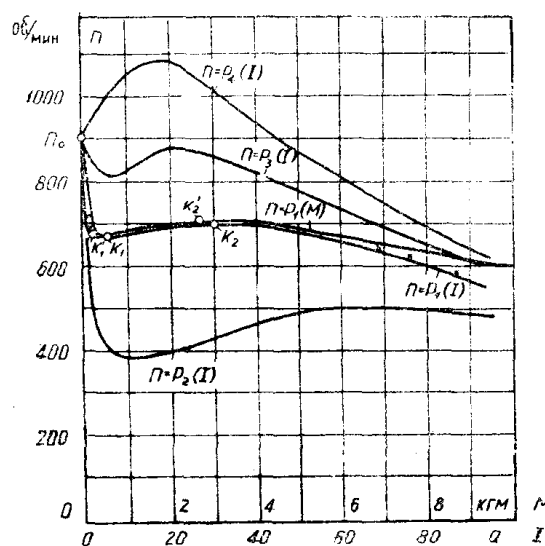


Рис. 3.

На рис. 3 показана статическая скоростная характеристика $n = P_1(I)$, рассчитанная согласно изложенной методике и построенная по точкам для системы рис. 1 при $R_{p2} = \infty$, $R_{p\partial} = \infty$.

Поскольку для регулирования скорости двигателя необходимо шунтировать обмотки возбуждения машин, построение искусственных характеристик в этом случае производится таким же образом, но с учетом уменьшения токов возбуждения генератора или двигателя. Рассмотрим случай, когда $R_{p2} = \infty$, $R_{p2} < \infty$. Обозначим через μ_2 от-

ношение общего тока I (рис. 1) к току, протекающему через обмотку возбуждения генератора

$$\mu_2 = \frac{I}{I_{\partial 2}}$$

При подключении сопротивления R_{p2} , параллельно обмотке возбуждения генератора, общее сопротивление цепи возбуждения будет

$$R_{общ\ в2} = \frac{R_{в2} \cdot R_{p2}}{R_{в2} + R_{p2}}.$$

Тогда можно написать

$$IR_{общ\ в2} = I_p \cdot R_{p2} = I_{в2} \cdot R_{в2},$$

откуда

$$\frac{I}{I_{в2}} = \frac{R_{в2} + R_{p2}}{R_{p2}} = \mu_2$$

или

$$\mu_2 = \frac{R_{в2}}{R_{p2}} + 1. \quad (3)$$

При подключении сопротивления R_{p2} изменится и общее сопротивление цепи, которое теперь равно

$$R_{общ} = R_{я2} + R_{яд} + R_{овд} + R_{общ\ в2}.$$

Построение характеристик ведется следующим образом.

1. Выбрав сопротивление реостата R_{p2} , по уравнению (3) определяем μ_2 .

2. Задаемся произвольными значениями тока I в силовой цепи и определяем для каждого его значения ток, протекающий через обмотку возбуждения генератора

$$I_{в2} = \frac{I}{\mu_2}.$$

По характеристике $e_2 = f(I)$ величина э. д. с. генератора будет соответствовать теперь току $I_{в2}$. Вследствие того, что $e_{\partial в}$ определяется графически, как разность ординат характеристик $e_2 = f(I_{в2})$ и $IR = F(I)$, необходимо перестроить характеристику намагничивания генератора в оси координат e_2, I (рис. 4).

3. Строим новые характеристики $IR_{общ\ в1} = F_1(I)$ и $e_{\partial в} = \psi_1(I)$, где $R_{общ\ в1}$ — общее сопротивление силовой цепи при подключенном параллельно обмотке возбуждения генератора сопротивлении R_{p2} .

4. Определяем значения $e_{\partial в} = \psi_1(I)$ и $\frac{E}{n} = \varphi(I)$ для различных токов и по уравнению (2) находим точки искусственной скоростной характеристики.

Искусственные скоростные характеристики при подключении сопротивления, параллельно обмотке возбуждения двигателя могут быть построены тем же способом, но с учетом ослабления магнитного потока двигателя. Построение ведется в следующей последовательности.

1. Выбрав сопротивление реостата $R_{p\partial}$ по уравнению, аналогичному уравнению (3), определяем значение $\mu_{\partial в}$ для двигателя

$$\mu_{\partial в} = \frac{R_{в\partial}}{R_{p\partial}} + 1.$$

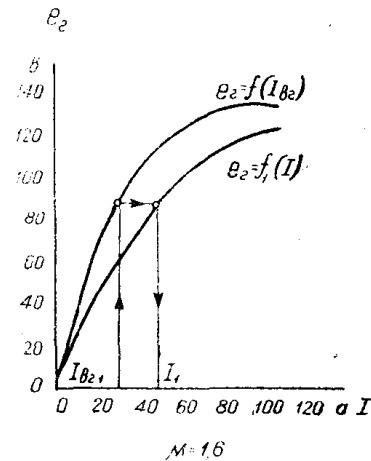


Рис. 4.

2. Задаемся произвольными значениями тока I в силовой цепи и определяем для каждого его значения ток, протекающий через обмотку возбуждения двигателя

$$I_{вд} = \frac{I}{\varphi_d}.$$

3. По характеристике намагничивания двигателя определяем значение $\left(\frac{E}{n}\right)$, соответствующее $I_{вд}$.

4. Строим новые характеристики $IR_{общ.2} = F_2(I)$ и $e_{дв} = \psi_2(I)$, где $R_{общ.2}$ — общее сопротивление силовой цепи, при подключенном параллельно обмотке возбуждения двигателя сопротивлении $R_{р\partial}$.

5. Определяем значения $e_{дв} = \psi_2(I)$ и $\left(\frac{E}{n}\right) = \varphi(I_{вд})$ для разных токов, и по уравнению (2) находим точки скоростной характеристики.

На рис. 3 для испытываемых машин построены искусственные характеристики при ослаблении магнитного потока генератора $n = P_2(I)$

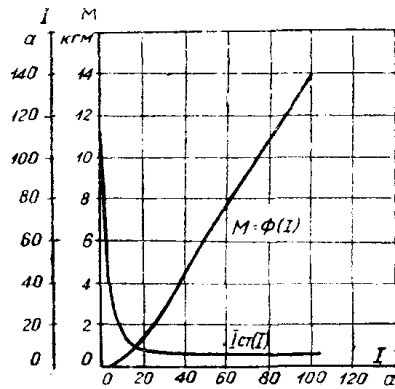


Рис. 5.

и двигателя $n = P_3(I)$ и $n = P_4(I)$. Получить механические характеристики из скоростных можно, используя переходную кривую $M = \Phi(I)$ (рис. 5), которая строится по выражению $M = \frac{c'_{\mathcal{M}}}{c'_{e_{дв}}} \varphi(I) \cdot I$.

Последняя получается из $M = c'_{\mathcal{M}} \Phi_{дв} I$ с учетом, что $\Phi_{дв}$ определяется из выражения $c'_{e_{дв}} \cdot \Phi_{дв} = \frac{E}{n} = \varphi(I)$. Механи-

ческая характеристика $n = P_1(M)$ при $R_{р\partial} = \infty$ и $R_{р2} = \infty$ представлена на рис. 3.

Совместное исследование статической механической характеристики двигателя и механизма показывает, что на участках, где

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{ст}}{dn}$$

наблюдается устойчивая работа привода [4]. Из рис. 3 видно, что при $M_{ст} = \text{const}$ это условие выполняется на участке $n_0 - k'_1$ и участке вправо от точки k'_2 характеристики $n = P_1(M)$. Участок же $k'_1 - k'_2$, расположенный между двумя экстремальными значениями механической характеристики, соответствует неустойчивой работе привода в силу того, что не удовлетворяется условие $\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{ст}}{dn}$.

Таким образом, точки k'_1 и k'_2 (рис. 3), в которых $n = n_{\text{макс}}$ и $n = n_{\text{мин}}$ являются точками смены устойчивости. Этим точкам на характеристике $n = P_1(I)$ соответствуют точки k_1 и k_2 .

Колебания в системе генератор — двигатель с машинами последовательного возбуждения

Для исследования динамики данной системы необходимо иметь дифференциальное уравнение движения. Во всех дальнейших выводах, с целью их упрощения, нелинейные характеристики $e_2 = f(I)$ и $IR = F(I)$

заменяются одной нелинейной характеристикой $\psi(I) = f(I) - F(I)$, показанной на рис. 2а. В связи с этим уравнение (1) перепишем с учетом выражения $e_{\partial\delta} = \varphi(I)n$ и характеристики $\psi(I)$ следующим образом:

$$\psi(I) - \varphi(I)n - L(I) \frac{dI}{dt} = 0. \quad (1a)$$

Принимая во внимание, что

$$\Phi_{\partial\delta} = \frac{\varphi(I)}{C'_{e_{\partial\delta}}}; \quad M = C'_M \Phi_{\partial\delta} I; \quad M_{cm} = C'_M \Phi_{\partial\delta} I_{cm}(I);$$

$$I_{cm}(I) = \frac{M_{cm} \cdot C'_{e_{\partial\delta}}}{C'_M \cdot \varphi(I)} \quad (4)$$

и рассматривая случай, когда $M_{cm} = \text{const}$, на основании уравнения движения привода $M - M_{cm} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ получим:

$$I = \frac{GD^2 \cdot C'_{e_{\partial\delta}}}{375 \cdot C'_M \cdot \varphi(I)} \frac{dn}{dt} + I_{cm}(I). \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение для тока получится, если уравнение (1а) разделить на $\varphi(I)$ (чтобы освободиться от переменного коэффициента при n), продифференцировать и производную $\frac{dn}{dt}$ заменить из выражения (5). Окончательно выражение для тока будет следующим:

$$L(I) \frac{d^2 I}{dt^2} + \left[L'(I) \frac{dI}{dt} + \frac{\varphi'(I) \cdot \psi(I)}{\varphi(I)} - \right.$$

$$\left. - \frac{\varphi'(I)}{\varphi(I)} L(I) \frac{dI}{dt} - \psi'(I) \right] \frac{dI}{dt} +$$

$$+ [I - I_{cm}(I)] \frac{375 C'_M [\varphi(I)]^2}{GD^2 C'_{e_{\partial\delta}}} = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) $L(I)$ — индуктивность якорей и обмоток возбуждения генератора и двигателя является нелинейной функцией тока в силу насыщения магнитной системы электрических машин. Зависимость $L(I)$ приведена на рис. 6.

Коэффициент при $\frac{dI}{dt}$ в уравнении (6) является диссипативным членом, состоящим из нелинейных функций $L(I)$, $\varphi(I)$, $\psi(I)$ и их производных. Коэффициент при $[I - I_{cm}(I)]$ является величиной обратной электродинамической емкости

$$\frac{375 \cdot C'_M [\varphi(I)]^2}{GD^2 \cdot C'_{e_{\partial\delta}}} = \frac{1}{C_{дин}(I)} = \left[\frac{1}{\text{фарад}} \right].$$

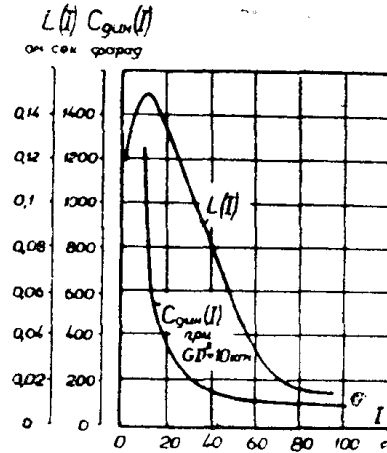


Рис. 6.

Зависимость нелинейной электродинамической емкости $C_{дин}(I)$ показана на рис. 6. В силу сказанного, уравнение (6) является дифференциальным уравнением движения системы с нелинейными электродинамической емкостью, индуктивностью и диссипативным членом.

Исследование механического переходного процесса

Уравнение механического переходного процесса, в котором учитывается лишь механическая инерция привода, получается из уравнения (6), полагая $L(I) \rightarrow 0$:

$$\left[\frac{\varphi'(I) \cdot \psi(I)}{\varphi(I)} - \psi'(I) \right] \frac{dI}{dt} + \left[I - I_{cm}(I) \right] \frac{375 \cdot C'_M [\varphi(I)]^2}{GD^2 \cdot c'_{e_{\partial\delta}}} = 0. \quad (7)$$

Напишем (7) относительно $\frac{dI}{dt}$ с учетом (2) и исследуем полученное уравнение

$$\frac{dI}{dt} = - \frac{375 \cdot c'_M [\varphi(I)]^2 [I - I_{cm}(I)]}{GD^2 \cdot c'_{e_{\partial\delta}} [\psi'(I) - \varphi'(I) \cdot n]}. \quad (8)$$

Согласно уравнению (4) $I_{cm}(I)$ при $M_{cm} = \text{const}$ принимает в зависимости от тока I разные значения (рис. 5). При условии $M = M_{cm}$

$$c'_{e_{\partial\delta}} \cdot \Phi_{\partial\delta} \cdot I = c'_{e_{\partial\delta}} \cdot \Phi_{\partial\delta} \cdot I_{cm}(I),$$

откуда следует, что $I = I_{cm}(I)$. Следовательно, по уравнению (8) $\frac{dI}{dt} = 0$. Если величина M_{cm} обуславливает работу системы на участках устойчивой работы скоростной характеристики ($n_0 - k_1$ и $k_2 - a$) (рис. 7), то двигатель будет работать с постоянной скоростью и током

$$\left(\frac{dI}{dt} = 0 \right).$$

Знаменатель уравнения (8) также может принимать в зависимости от тока разные значения. Так, при $I > I_{K_2}$ или $I < I_{K_1}$

$$[\psi'(I) - \varphi'(I) \cdot n] < 0;$$

при $I = I_{K_1}$ или $I = I_{K_2}$, когда система пришла на границу устойчивости,

$$[\psi'(I) - \varphi'(I) \cdot n] = 0$$

и при $I_{K_1} < I < I_{K_2}$

$$[\psi'(I) - \varphi'(I) \cdot n] > 0.$$

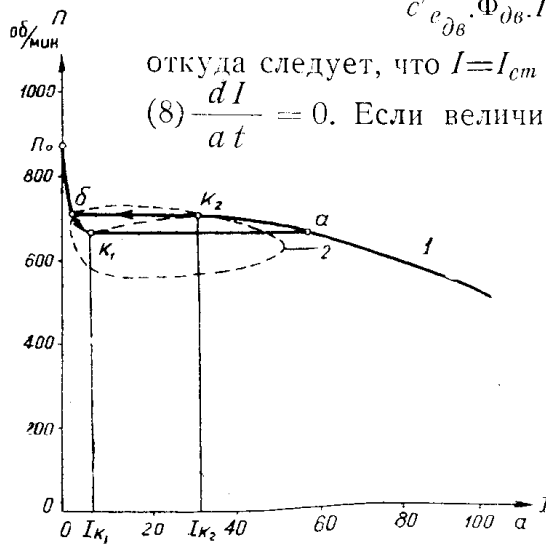


Рис. 7.

Данные выводы сделаны на основании анализа характеристик (рис. 2 а, 2 б и 3) и доказываются ниже. В таблице 1 показаны результаты обработки опытных и расчетных характеристик, приведенных на рис. 2 а, 2 б и 3. Из таблицы 1 видно, что вблизи значений токов $I_{K_2} = 25 \div 30$ а и $I_{K_1} = 6 \div 8$ а знак у $[\psi'(I) - \varphi'(I)n]$ меняется с минуса на плюс, проходя через нуль, и наоборот. Что $[\psi'(I) - \varphi'(I)n] = 0$ при подстановке $I = I_{K_1}$ и $I = I_{K_2}$ видно так же и из следующего. Продифференцировав (1 а) по току с учетом, что $L(I) = 0$, получим

$$\psi'(I) - n' \varphi(I) - \varphi'(I)n = 0;$$

учитывая, что в критических точках k_1 и k_2 , когда $I = I_{K_1}$ или $I = I_{K_2}$, скорость по скоростной характеристике имеет свое максимальное или минимальное значение, когда $n' = 0$, будем иметь $\psi'(I_{K_2}) - \varphi'(I_{K_2})n = 0$. Итак, при токе, равном I_{K_1} или I_{K_2} , знаменатель уравнения (8) обращается в нуль, а первая производная тока по времени в бесконечность. Это говорит за то, что ток в точках скоростной характеристики k_2 или k_1 должен мгновенно изменить свое значение. Поскольку мы положили $L(I) = 0$ и изменение тока теперь не связано с изменением энергии магнитного поля, то нового состояния, соответствующего точке б или а (рис. 7), система достигнет в результате „скачка“, при котором ток I может измениться мгновенно, а скорость остается неизменной. Проследим возможные движения в системе при условии $M'_{K_1} < M_{cm} < M'_{K_2}$, когда возможное состояние равновесия при $M = M_{cm}$ является неустойчивым. При включении рубильника Р (рис. 1) двигатель подключается к генератору и начинается процесс возбуждения машин, сопровождающийся броском тока при неподвижном якоре двигателя. При некотором значении момента двигатель начнет разгоняться. В процессе разгона I спадает и двигатель стремится к состоянию равновесия, при котором $M = M_{cm}$ и $I = I_{cm}$. Как только скорость двигателя достигнет значения $n_{\max}$, соответствующего точке k_2 , уравнение движения (8) теряет свою аналитичность, так как $\frac{dI}{dt} = \infty$. Дальнейшее движение опре-

деляется условием скачка: ток изменяется мгновенно, скачком, а скорость двигателя мгновенно измениться не может, поскольку ее изменение связано с изменением кинетической энергии привода

$$J \frac{\omega_{\max}^2}{2} = \frac{GD^2 \pi^2}{7200 \cdot g} n_{\max}^2.$$

В противном случае потребовалась бы система бесконечной мощности. Поэтому скорость до скачка, соответствующая точке k_2 , должна быть равной скорости после скачка, т. е. скорости в точке б скоростной характеристики (рис. 7) или

$$n_{K_2} = n_b.$$

После скачка тока в точку б дальнейшее движение будет происходить непрерывно и описываться уравнением (8). Движение будет прохо-

Таблица 1

I	$[\psi'(I) - \varphi'(I)n]$
2	-0,79
10	-0,01
15	+0,16
20	0,044
25	0,001
30	-0,14
60	-0,39

доть по устойчивому участку характеристики в сторону увеличения тока, так как $M < M_{cm}$ и $I < I_{cm}(I)$, до тех пор, пока система не придет в точку k_1 . В точке k_1 снова $\frac{dI}{dt}$ обращается в бесконечность, что вызывает последующий скачок тока до значения I_a . Условие скачка в этом случае будет

$$n_{k_1} = n_a.$$

После скачка система снова будет стремиться к состоянию равновесия, повторяя движение по участку характеристики $a - k_2$ и т. д. Чередование описанных движений, сопровождающихся скачками тока, приводит к возникновению в системе „разрывных“ автоколебаний для тока и непрерывных для скорости. Построенная на рис. 7 замкнутая кривая b, k_1, a, k_2 является динамической скоростной характеристикой при принятой идеализации. На рис. 8 приведена осцилло-

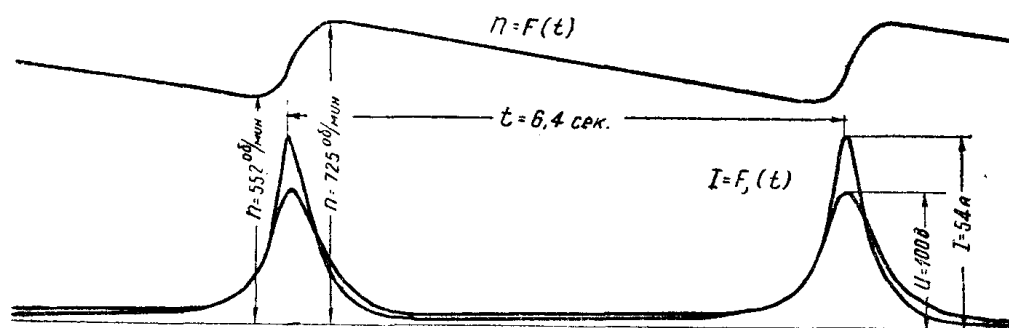


Рис. 8.

грамма переходного процесса скорости и тока для схемы рис. 1 при $R_{p2} = \infty$ и $R_{p0} = \infty$. На рис. 7 (кривая 2) показан тот же переходный процесс в осях скорость — ток, полученный путем обработки указанной осциллограммы. Как видно из сравнения кривых 1 и 2, расчетная характеристика 1 удовлетворительно отражает качество переходного процесса. Количественное расхождение приведенных характеристик обусловлено той идеализацией, которая применялась при исследовании.

Электромеханический переходный процесс

Исследование электромеханического переходного процесса проводится по уравнению (6), в котором $L(I)$, $\varphi(I)$, $\psi(I)$ и $C_{дин}(I)$ являются нелинейными функциями, а $M_{cm} = \text{const}$.

Интегрирование дифференциального уравнения (6) аналитическими методами оказывается невозможным. В силу указанных обстоятельств для исследования данной динамической системы можно применить методы качественного интегрирования, из которых наиболее подходящим для данной системы является метод изоклин [10, 11]. Указанный метод позволяет построить фазовый портрет для тока. Однако учет всех указанных нелинейностей приводит к очень сложному уравнению изоклин. Поэтому решение уравнения (6) проводим только с учетом существенных нелинейностей $\psi(I)$ и $C_{дин}(I)$, а характеристики $L(I)$ и $\varphi(I)$ принимаем линейными

$$L(I) = \text{const},$$

$$\varphi(I) = k_0 \cdot I.$$

Нелинейную характеристику $\psi(I)$ аппроксимируем полиномом второй степени

$$\psi(I) = \alpha I - \beta I^2, \quad (9)$$

где α и β постоянные коэффициенты, величина которых определяется характеристикой. Численные значения α и β следующие:

$$\alpha = 2,65,$$

$$\beta = 0,02.$$

Подставляя (9) в (6), производя замену переменных

$$\frac{dI}{dt} = y; \quad \frac{d^2I}{dt^2} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dI} y = \Theta \cdot y$$

и разрешая полученное уравнение относительно y , будем иметь уравнение изоклин:

$$y = I \left[\left(-\frac{\Theta}{2} + \frac{\beta I}{2.L} \right) \pm \sqrt{\left(-\frac{\Theta}{2} + \frac{\beta I}{2.L} \right)^2 + \frac{k_{\partial}^2 \cdot I^2 \cdot 375 \cdot c'_{\text{м}}}{GD^2 \cdot C'_{e_{\partial\delta}}} - \frac{k_{\partial} \cdot 375}{GD^2 \cdot L} \cdot M_{\text{см}}} \right]. \quad (10)$$

Задаваясь различными значениями тока I и $\Theta = \frac{dy}{dI}$, на фазовой плоскости строим семейство изоклин (рис. 9).

Определяем начальные условия из уравнения (1). Полагаем $n=0$ ($e_{\partial\delta}=0$) и $I=I_{Tp}=I_{\text{см}}(I)$, тогда

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{трое}} = \frac{e_{2Tp} - I_{Tp} \cdot R}{L}.$$

e_{2Tp} определяем из характеристики $e_2=f(I)$ (рис. 2а). Пользуясь известным методом [11], строим интегральную кривую переходного процесса на фазовой плоскости (рис. 9). Наличие замкнутой интегральной кривой (предельного цикла), источника энергии, не обладающего колебательными свойствами (асинхронный двигатель), а также нелинейного ограничителя колебаний (нелинейная характеристика генератора) позволяет сделать вывод — возникающие в системе колебания являются автоколебаниями. Предельный цикл автоколебаний дает возможность непосредственно определить амплитуду колебаний, период которых определится при построении переходного процесса во времени. Развертку фазового портрета во времени делаем по формуле [11]

$$\Delta t_i = \int_{I_i}^{I_{i+1}} \frac{dI}{y} = \frac{I_{i+1} - I_i}{y_{i+1} - y_i} \cdot \ln \frac{y_{i+1}}{y_i}.$$

Переходный процесс $I(t)$ приведен на рис. 9.

Фазовый портрет для скорости двигателя в данной системе получить затруднительно в силу того, что дифференциальное уравнение

движения для скорости является функцией трех переменных: скорости, производной скорости и тока. Поэтому для исследования переходного процесса $n(t)$ поступаем следующим образом. Из уравнения (1) после подстановки $e_2 = f(I)$ и $e_{\partial\partial} = \varphi(I)$ имеем:

$$n_{\partial\partial} = \frac{f(I) - IR(I) - L(I) \frac{dI}{dt}}{\varphi(I)} \quad (11)$$

В уравнении изоклин $L(I) = \text{const}$. Для большей точности в (11) полагаем $L(I)$ нелинейной функцией, изображенной на рис. 6. Для за-

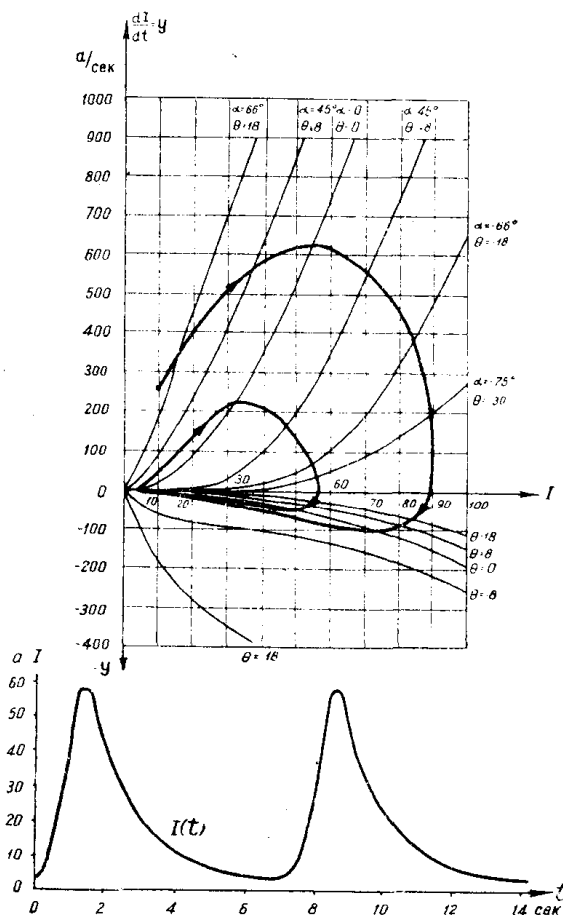


Рис. 9.

данных значений тока $L(I)$ определяется по рис. 6, $\frac{dI}{dt}$ — по фазовому портрету (рис. 9), $f(I)$ и $IR(I)$ — по рис. 2 а, а $\varphi(I)$ — по рис. 2 б. Динамическая скоростная характеристика $n_{\partial\partial}(I)$ построена согласно (11) на рис. 10. Имея характеристику $I(t)$ и $n_{\partial\partial}(I)$, строим характеристику переходного процесса $n(t)$, которая приведена на рис. 11.

Проведенные выше исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Колебания, возникающие в системе генератор — двигатель с машинами последовательного возбуждения (электрохимическая система с нелинейной электродинамической емкостью), являются автоколебаниями, а сама система — автоколебательной.

2. Возникновение колебаний происходит в результате перехода системы из устойчивой зоны характеристик машин в неустойчивую и обратно, причем для системы генератор — двигатель с машинами последовательного возбуждения при отсутствии сопротивлений, шумя-

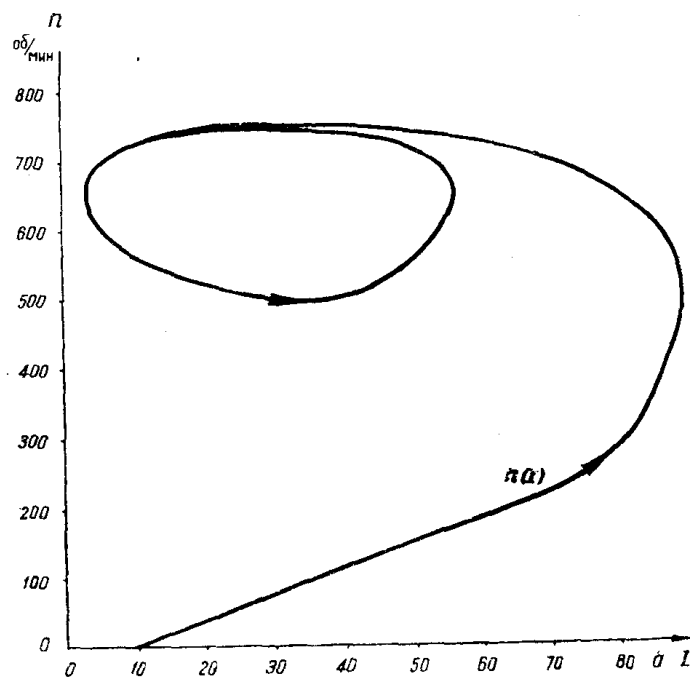


Рис. 10.

тирующих обмотки возбуждения машин, ток и скорость изменяются в области положительных значений. В этом случае колебания происходят без перемагничивания генератора и реверса двигателя.

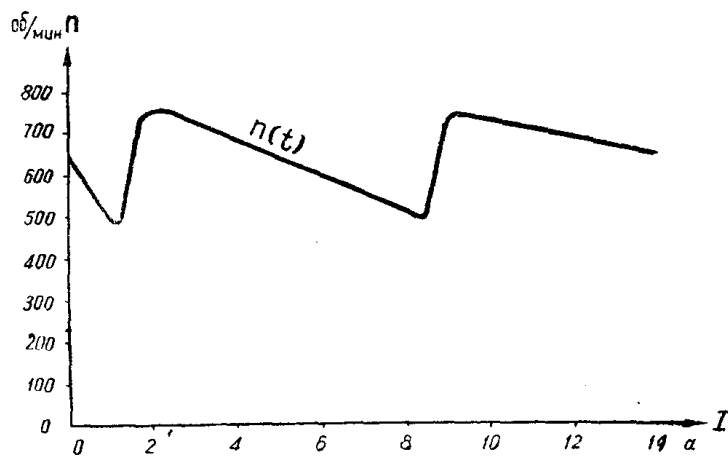


Рис. 11.

3. Анализ разрывных колебаний в системе позволяет выявить в первом приближении влияние нагрузки ($M_{см}$) на колебания. Колебания в системе возникают в случае, если $M_{к'} < M_{см} < M_{к''}$. Во всех других случаях наблюдается устойчивая работа системы с постоянными n , I и M , которые определяются нагрузкой и механической характеристикой системы.

4. Исследование механического переходного процесса, когда $L(I) = 0$, не прибегая к интегрированию нелинейного дифференциального уравнения (7), дает представление о характере колебаний в системе генератор—двигатель с машинами последовательного возбуждения. Для более точного количественного и качественного исследования колебаний в этой системе необходимо исследовать электромеханический переходный процесс.

5. Данная методика исследования электромеханического переходного режима удовлетворительно отражает как качественную, так и количественную сторону процессов, происходящих в системе.

6. С помощью данного метода можно строить динамические скоростные и механические характеристики системы.

7. При помощи данного метода появляется возможность более подробного исследования влияния нелинейных параметров и нагрузки на автоколебания и выявления физики автоколебаний.

Автор выражает благодарность доц. Ганджа Л. И. за ряд указаний, которые были учтены при подготовке статьи к печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандлер А. С., Соколов Н. Г. Статические характеристики серийного двигателя, питаемого от серийного генератора. „Электричество“, № 10, 1948.
2. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. Изд. 2, 1953.
3. Пресс С. А. Электрическое оборудование металлорежущих станков. Машгиз, 1949.
4. Попов В. К. Основы электропривода. ГЭИ, 1951.
5. Голован А. Т. Электропривод, ГЭИ, 1948.
6. Kokichi Nitta, „Elektrotechnische zeitschrift“, 1955, ausgabe A, Band 76, Heft 14.
7. Шулейкин М. О свободных колебаниях в цепи серийный генератор и мотор. Изд. С. Петербургского политехнического института, т. XI, вып. 2, 1909.
8. Нейман Л. Р. Теоретические проблемы современной электротехники. „Электричество“, № 7, 1955.
9. Соломонович А. Е. Об электрическом и механическом феррорезонансе. „Успехи физических наук“, т. XXXIV, вып. 3, 1948.
10. Андронов А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. Часть 1, ОНТИ, НКТП, 1937.
11. Физические основы электротехники. 1 ЭИ, 1950.
12. Кулебакин В. С., Нагорский В. Д. Электропривод самолетных агрегатов и механизмов. ГИОП, 1958.