

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Академик В. П. НИКИТИН

**О ДИНАМИЧЕСКОМ РАВНОВЕСИИ СИСТЕМ С НЕПРЕРЫВНО  
МЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКОЙ**

Энергетический баланс производственных машин, работающих с непрерывно меняющейся нагрузкой, в каждый момент времени определяется состоянием равновесия. Это состояние равновесия не остается длительно устойчивым в подобных машинах, а меняется в функции текущей переменной—времени.

Так, например, при работе электрического генератора на дугу при сварке металлов плавление электрода и переход капли на изделие вызывают резкие колебания длины дуги и повторяющиеся через очень малые промежутки времени (до 30 и более раз в секунду) короткие замыкания генератора. Ток и напряжение при этом не сохраняют постоянства своего значения, а имеют мгновенные изменения от некоторого значения до максимального и обратно.

Подобные резкие изменения нагрузки нарушают установившееся длительное состояние равновесия в системе и вызывают в ней переходные процессы. Переход от одного установившегося состояния равновесия к другому обычно сопровождается появлением сил переходного процесса, действующих в системе от начала нарушения состояния равновесия до перехода системы в новое состояние равновесия.

Действие этих сил переходного процесса выражается в том, что в системе каждый момент времени устанавливается динамическое равновесие, которое и характеризует устойчивость работы данной системы.

При рассмотрении работы всех подобных производственных машин и машин-двигателей, естественно, возникают следующие вопросы:

1) Каковы будут условия динамического равновесия системы и будет ли работа системы устойчивой?

2) Каковы будут мгновенные значения перемещений, дозволяемых связями системы при переходных процессах, или каковы будут изменения при переходных процессах основных параметров, как момента, скорости и тока и т. д.?

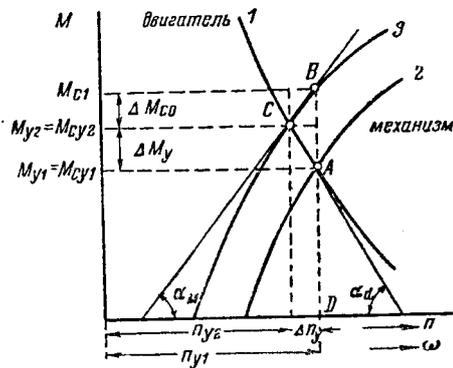
3) Как скоро будет происходить переход системы из одного длительно устойчивого состояния равновесия в другое?

Решение поставленных вопросов и применение этого решения как общего закона динамического равновесия на примерах электрических двигателей и генераторов и явились целью настоящей и последующих работ.

Под устойчивостью системы понимается такое ее состояние, когда при изменении производственных условий и возникших вследствие этого

отклонений от положений длительно устойчивого равновесия система быстро приходит снова в состояние равновесия.

Состояние равновесия системы: производственная машина — машина-двигатель определяется точкой пересечения характеристик  $M_c = f(\omega)$  производственной машины и  $M = f_1(\omega)$  машины-двигателя (Фиг. 1), где  $M$  — момент двигателя,  $M_c$  — момент сопротивления производственной машины,  $\omega$  — угловая скорость.



Фиг. 1.

Если под действием тех или иных причин нарушится условие равновесия, то значения  $M_c$ ,  $M$  и  $\omega$  получают приращения  $\Delta M_c$ ,  $\Delta M$  и  $\Delta\omega$ . Обозначая через  $J$  момент инерции привода, имеем уравнение машины-двигателя

$$\Delta M = \Delta M_c + J \frac{d\Delta\omega}{dt}. \quad (1)$$

Принимая в пределах небольших интервалов зависимости  $M = f_1(\omega)$  и  $M_c = f(\omega)$  за прямые, получим, интегрируя уравнение

$$\omega - \omega_y = \Delta\omega = \Delta\omega_y e^{-\frac{1}{J} \left( \frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega} \right) t} = \Delta\omega_y \cdot e^{-\frac{S}{J} t},$$

где  $\omega_y$  — установившаяся скорость при состоянии равновесия,  $\Delta\omega_y$  — полное приращение скорости, а  $S = \frac{dM_c}{d\omega} - \frac{dM}{d\omega}$  может быть названо коэффициентом устойчивости.

Для того чтобы режим работы был устойчивым, необходимо соблюдение условий

$$J > 0 \text{ и } S > 0.$$

Скорость процесса убывания приращения  $\Delta\omega$  будет тем больше, чем больше величина  $S$ .

Коэффициент устойчивости может быть выражен также в виде (Фиг. 1)

$$S = \operatorname{tg} \alpha_M - \operatorname{tg} \alpha_D = R_M - R_D = R_S,$$

где  $R_M = \operatorname{tg} \alpha_M$  — сопротивление или сила связи производственной машины, а  $R_D = \operatorname{tg} \alpha_D$  — сопротивление или сила связи машины-двигателя. Таким образом величина коэффициента устойчивости определяется как разность между силой связи производственной машины и силой связи машины-двигателя и может быть представлена как разностная сила связи данной системы.

Подобные же выводы могут быть получены и при рассмотрении работы и других систем, например, работы электрического генератора на дугу при сварке металлов (1, 2); установившийся режим дуги определяется условием равновесия, т. е. точкой пересечения характеристики дуги  $U_D = f(I)$  и характеристики генератора  $U = f_1(I)$ , причем под режимом дуги понимается такое ее устойчивое состояние, когда дуга может гореть длительно при определенной величине тока, не угасая и не переходя в другие формы разрядов.

Уравнение переходного процесса может быть представлено так:

$$U = f(I) - L \frac{dI}{dt}.$$

Решая это уравнение, имеем

$$\Delta I = \Delta I_0 \cdot e^{-\frac{1}{L} \left( \frac{dU_0}{dt} - \frac{dU}{dt} \right) t}.$$

Поэтому условием устойчивости будут:

1) Индуктивность генератора  $L > 0$

и

$$2) \frac{dU_0}{dt} - \frac{dU}{dt} = S > 0.$$

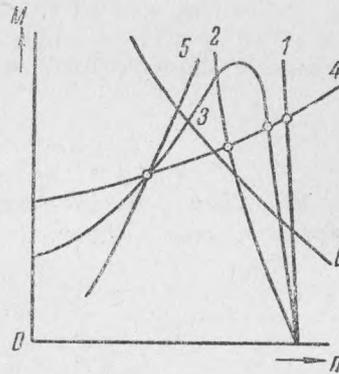
Для системы: электродвигатель — механизм при переходе с режима, характеризуемого значениями  $M_{y1}$  и  $n_{y1}$  (фиг. 1), на режим  $M_{y2}$  и  $n_{y2}$ , что соответствует переходу с одной характеристики механизма на другую, имеем уравнение

$$M = M_c + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt},$$

где  $M$  и  $n$  — момент и число оборотов двигателя,  $M_c$  — момент сопротивления механизма. Решая это уравнение, аналогично предыдущему, получим

$$\Delta n = \Delta n_y \cdot e^{-\frac{375}{GD^2} \left( \frac{dM_c}{dn} - \frac{dM}{dn} \right) t} = \Delta n_y \cdot e^{-\frac{375 St}{GD^2}}.$$

Состояние системы электродвигатель — механизм будет устойчивым, если  $GD^2 > 0$  и  $S > 0$ . Подобные же условия получаются при переходе двигателя с одной характеристики на другую. Выполнение условия  $S > 0$  зависит от формы характеристики двигателя и механизма. На фиг. 2 приведены различные характеристики шунтового, компаундного и асинхронного двигателя и характеристика  $M_c = f(n)$  привода с вентиляторным моментом.



Фиг. 2.

Значение  $\frac{dM}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_0 < 0$  имеет место для шунтового компаундного и для правой, нисходящей части характеристики асинхронного двигателя; поэтому  $S > 0$ , так как  $\frac{dM_c}{dn} > 0$ , т. е. система в этом случае будет работать устойчиво.

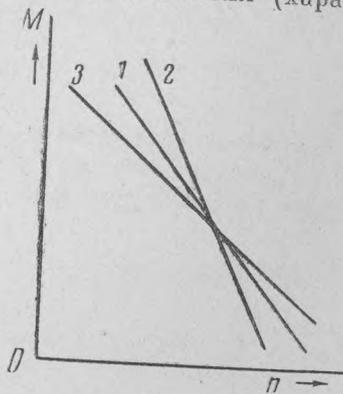
Для левой восходящей части характеристики асинхронного двигателя  $S < 0$  и равновесие системы неустойчиво, так как здесь  $\frac{dM}{dn} > 0$ , а  $\frac{dM_c}{dn} < \frac{dM}{dn}$  по абсолютной величине.

Однако, если механизм будет иметь характеристику 5, для которой  $\frac{dM_c}{dn} > \frac{dM}{dn}$ , то и для левой восходящей части равновесие системы устойчиво.

При падающей характеристике 6 механизма (например, стана бесслитковой прокатки) для правой нисходящей части характеристики двигателя работа будет устойчивой только при таком угле наклона характеристики механизма, для которого по абсолютной величине  $\left[ \frac{dM}{dn} \right] > \left[ \frac{dM_c}{dn} \right]$ , т. е. если характеристика двигателя будет круче характеристики механизма.

Для левой восходящей части характеристики работа при любых наклонах падающей характеристики механизма будет неустойчивой, так как  $S < 0$ .

Аналогично, для падающей характеристики механизма работа шунтового двигателя (характеристика 1) будет устойчива при работе на механизм с характеристикой 3, так как при этом  $\left[\frac{dM_c}{dn}\right] < \left[\frac{dM}{dn}\right]$  и  $S > 0$ , и неустойчива при работе на механизм с характеристикой 2, так как в этом случае  $\left[\frac{dM_c}{dn}\right] > \left[\frac{dM}{dn}\right]$  и  $S < 0$ .



Фиг. 3.

При тормозном режиме вследствие изменения направления момента двигателя меняется знак перед  $M$  и для торможения при горизонтальном движении получим

$$\Delta n = \Delta n_y e^{-\frac{1}{J} \left( \frac{dM_c}{dn} + \frac{dM}{dn} \right) t} \quad \text{и} \quad S = \frac{dM_c}{dn} + \frac{dM}{dn};$$

для торможения при отрицательном статическом моменте изменяется знак также и перед  $M_c$ , поэтому

$$\Delta n = \Delta n_y \cdot e^{-\frac{1}{J} \left( \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} \right) t} \quad \text{и} \quad S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn}.$$

Условием устойчивости для торможения при отрицательном статическом моменте будет

$$S = \frac{dM}{dn} - \frac{dM_c}{dn} = \operatorname{tg} \alpha_\partial - \operatorname{tg} \alpha_M > 0.$$

Поступило  
21 IX 1940

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. П. Никитин, Электричество (1928). <sup>2</sup> В. П. Никитин, Электрические машины и трансформаторы (1937).