ОБ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВАХ ПРОСТОЙ СИСТЕМЫ «ГЕНЕРАТОР — ДВИГАТЕЛЬ»

Л. И. Ганджа

(Представлено научно-методическим семинаром ЭМФ ТПИ)

Наиболее общим случаем простой системы „генератор—двигатель" является система с генератором и двигателем последовательного возбуждения, представленная на рис. 1. Исследование этой системы связано с очень большими трудностями, если ее рассматривать как нелинейную. Чтобы убедиться в этом, опишем ее соответствующими уравнениями. Исходным является уравнение

$$e_г = RI + L\frac{dI}{dt} + e_д, \tag{1}$$

описывающее переходный процесс тока I силовой цепи и справедливое, очевидно, при следующих допущениях:

1) отсутствие реакций якорей генератора и двигателя; это предполагает либо наличие в системе рис. 1 машин с компенсационными обмотками, либо пользование внутренними характеристиками намагничивания машин, учитывающими реакции якорей;

2) отсутствие для каждой из машин взаимной индуктивности между обмоткой независимого возбуждения и обмотками якоря и последовательного возбуждения, что означает независимость токов в обмотках независимого возбуждения от переходного процесса тока I в силовой цепи и их постоянство в случае отсутствия внешних воздействий на цепи обмоток независимого возбуждения;

3) отсутствие колебаний скорости генератора при колебаниях тока нагрузки;

4) отсутствие влияния вихревых токов, возникающих в массивных частях машин во время переходного процесса.

Этих допущений мы будем придерживаться во всем дальнейшем изложении. Исходя из них, мы можем пользоваться обычными „статическими" характеристиками намагничивания машин.

Учитывая сказанное, мы можем рассматривать э. д. с. генератора $e_г$ как линейную функцию суммарного магнитного потока $\Phi_г$ генератора, складывающегося из потока $\Phi_{гн}$ его независимой и из потока $\Phi_{гп}$ его последовательной обмоток возбуждения; исходя из кривой намагничивания генератора, потоки $\Phi_{гн}$ и $\Phi_{гп}$ являются нелинейными функциями соответствующих им токов $i_{гн}$ и I соответственно независимой обмотки возбуждения генератора и силовой цепи; поэтому $e_г$ является нелинейной функцией двух независимых переменных— токов $i_{гн}$ и I:

$$e_г = e_г(\Phi_г) = e_г(\Phi_{гн}, \ \Phi_{гп}) = e_г(i_{гн}, \ I). \tag{a}$$

При тех же условиях противо-э. д. с. двигателя $e_д$ может быть представлена как нелинейная функция скорости n двигателя и его суммарного магнитного потока Φ_{∂}, складывающегося из потока $\Phi_{\partial н}$ его независимой и из потока $\Phi_{\partial п}$ его последовательной обмоток возбуждения. Исходя из кривой намагничивания двигателя, эти потоки являются нелинейными функциями соответствующих им токов $i_{\partial н}$ и I соответственно независимой обмотки возбуждения двигателя и силовой цепи; поэтому e_{∂} может быть представлена как функция скорости n, тока возбуждения $i_{\partial н}$ и тока I:

$$e_{\partial} = C'_{e\partial} \Phi_{\partial} n = C'_{e\partial} (\Phi_{\partial н} + \Phi_{\partial п}) n = \varphi_{\partial e} (i_{\partial н}, I) n. \tag{б}$$

Первый член правой части уравнения (1) представляет собой падение напряжения в активном сопротивлении силовой цепи. Оно включает в себя и падение напряжения в переходном слое „щетки—коллектор“, которое является функцией многих переменных: силы тока I, направления этого тока, силы нажатия на щетки, скорости вращения якоря, сорта

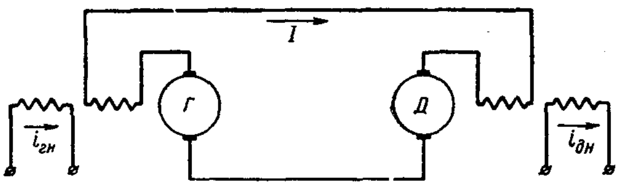

Рис. 1.

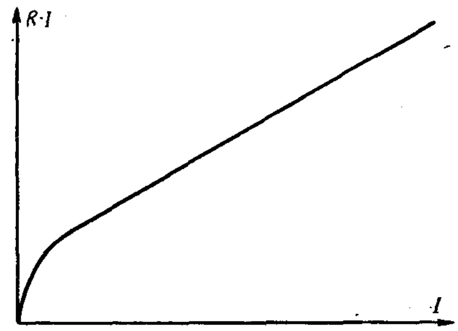

Рис. 2.

щеток и т. д. Так как, с одной стороны, большинство из этих факторов не поддается учету и аналитическому выражению, а с другой — влияние их, за исключением тока I, на падение напряжения на щетках невелико, будем в дальнейшем принимать во внимание только зависимость падения напряжения на щетках от тока I. Тогда, как известно, вольт-амперная характеристика силовой цепи может быть представлена в виде кривой, изображенной на рис. 2; из сказанного ясно, что сопротивление R силовой цепи является нелинейной функцией тока I:

$$R = R(I). \tag{в}$$

Второй член правой части уравнения (1) представляет собой составляющую э. д. с. генератора, затрачиваемую на преодоление противо-э. д. с. самоиндукции, наводимой в силовой цепи. Последняя, как известно, равна:

$$e_L = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{dI} \cdot \frac{dI}{dt} = L \frac{dI}{d},$$

где Ψ — величина потокосцеплений силового контура системы, рис. 1, а $\frac{d\Psi}{dI} = L$ представляет собой коэффициент дифференциальной индуктивности, определяемый по кривой намагничивания (рис. 3) и являющийся при наличии железа нелинейной функцией ампер-витков. Очевидно, что L может быть представлен нелинейной функцией трех независимых переменных — токов $i_{гн}$, $i_{\partial н}$ и I, поскольку совокупным действием этих токов определяется степень насыщения машин. Тогда

$$L = L(i_{гн}, i_{\partial н}, I). \tag{г}$$

Учитывая (а), (б), (в) и (г), получим на основании (1):

$$e_г(i_{гн}, I) = R(I) I + L(i_{гн}, i_{\partial н}, I) \frac{dI}{dt} + \varphi_{\partial e}(i_{\partial н}, I) n. \tag{1а}$$

Для исключения одной из переменных (I или n) воспользуемся уравнением движения двигателя:

$$M = M_{ст} + M_j = M_{ст} + \frac{GD^2}{375}\,\frac{dn}{dt}\,, \tag{2}$$

где момент M двигателя является нелинейной функцией тока и суммарного магнитного потока $\Phi_д$ двигателя и может быть представлен в виде:

$$M = C'_м \Phi_д I = C'_м (\Phi_{дн} + \Phi_{дп}) I = \varphi_{дм}(i_{дн},\ I)\, I, \tag{д}$$

а статический момент $M_{ст}$ в дальнейшем считается постоянным и реактивным, т. е. скачком, меняющим свой знак при изменении знака

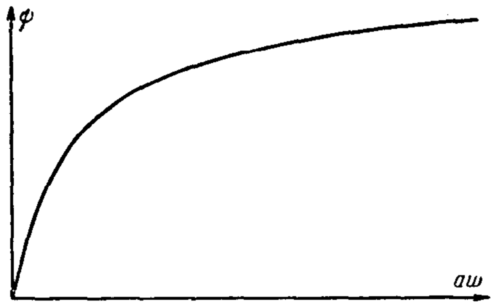

Рис. 3.

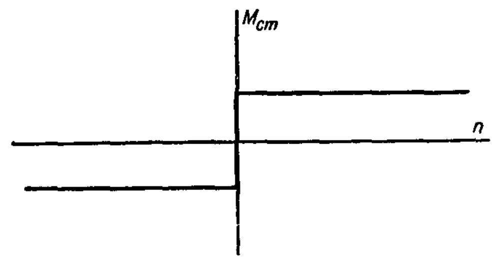

Рис. 4.

скорости и, таким образом, представляющим собой нелинейную функцию скорости, представленную на рис. 4. Подставляя (д) в (2), получим:

$$\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)\, I = M_{ст}(n) + \frac{GD^2}{375}\,\frac{dn}{dt}\,. \tag{2а}$$

Дифференцируя (1а) по времени и подставляя в него $\frac{dn}{dt}$ из (2а), получим нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка для тока двигателя:

$$\begin{aligned}
&\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{1}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)} \left\{ \frac{d[R(I)]}{dI} I + R(I) + \frac{\partial [L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)]}{\partial i_{гн}} \frac{di_{гн}}{dt} + \right.\\
&+ \left. \frac{\partial [L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)]}{\partial i_{дн}} \frac{di_{дн}}{dt} + \frac{\partial [L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)]}{\partial I} \frac{dI}{dt} - \frac{\partial [e_г(i_{гн},\ I)]}{\partial I} \right\} \frac{dI}{dt} + \\
&+ \frac{375}{GD^2}\, \frac{\varphi_{дe}(i_{дн},\ I)\, \varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)} I + \frac{1}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)} \times \\
&\times \left\{ \frac{\partial [\varphi_{дe}(i_{дн},\ I)]}{\partial i_{дн}} \frac{di_{дн}}{dt} + \frac{\partial [\varphi_{дe}(i_{дн},\ I)]}{\partial I} \frac{dI}{dt} \right\} n - \\
&- \frac{1}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)} \frac{\partial [e_г(i_{гн},\ I)]}{\partial i_{гн}} \frac{di_{гн}}{dt} - \frac{375}{GD^2}\, \frac{M_{ст}(n)}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)} \varphi_{дe}(i_{дн},\ I) = 0;
\end{aligned} \tag{3а}$$

окончательно скорость n может быть исключена путем подстановки ее значения из (1а) в (3а); однако мы этого преобразования делать не будем, имея в виду, что оно не имеет значения с точки зрения последующего изложения.

Исключая же из (1а) ток I путем подстановки его значения из (2а), получим окончательно нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка для скорости двигателя:

$$\frac{d^2n}{dt^2}+\left\{\frac{R(I)}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)}+\frac{375}{GD^2}M'_{ст}(n)-\frac{1}{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}\frac{\partial[\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)]}{\partial i_{дн}}\frac{di_{дн}}{dt}-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}\frac{\partial[\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)]}{\partial I}\frac{dI}{dt}\right\}\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}\left\{\frac{R(I)}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)}-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}\frac{\partial[\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)]}{\partial i_{дн}}\frac{di_{дн}}{dt}-\frac{1}{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}\frac{\partial[\varphi_{дм}(i_{дн},I)]}{\partial I}\frac{dI}{dt}\right\}M_{ст}(n)+$$
$$+\frac{375}{GD^2}\frac{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)\,\varphi_{де}(i_{дн},\ I)}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)}n-\frac{375}{GD^2}\frac{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}{L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)}e_г(i_{гн},\ I)=0. \qquad (3б)$$

Из уравнений (3а) и (3б) следует, что при упомянутых выше допущениях система рис. 1 представляется как динамическая система с тремя степенями свободы, поскольку она описывается тремя независимыми переменными — токами $i_{гн}$, $i_{дн}$ и I.

Исследование этих уравнений в общем виде представляет непреодолимые трудности. Естественно поэтому начать изучение системы рис. 1 с исследования более простых частных случаев, из нее вытекающих.

Примем следующие допущения:

1. Будем считать, что к цепям обмоток независимого возбуждения машин внешние воздействия не приложены. Тогда $i_{гн}=\text{const}$ и $i_{дн}=\text{const}$, $\frac{di_{гн}}{dt}=0$ и $\frac{di_{дн}}{dt}=0$ и соответствующие члены уравнений (3а) и (3б), содержащие эти производные, обращаются в нуль; $i_{гн}$ и $i_{дн}$ в соответствующих функциях, входящих в уравнения (3а) и (3б), могут рассматриваться как параметры, что приводит к зависимости этих функций только от одного переменного I. Тогда соответствующие частные производные переходят в обыкновенные производные по I.

2. Положим $M_{ст}(n)=0$, т. е. будем рассматривать переходные процессы в системе рис. 1 при отсутствии нагрузки на валу двигателя; при этом члены уравнений (3а) и (3б), содержащие $M_{ст}(n)$ и $M'_{ст}(n)$, обращаются в нуль.

3. Положим далее, что $L(i_{гн};\ i_{дн},\ I)=\text{const}$ и $R(I)=\text{const}$; тогда члены уравнений (3а) и (3б), содержащие производные от $L(i_{гн},\ i_{дн},\ I)$ и $R(I)$, также обращаются в нуль.

Прилагая сказанное к (3а) и (3б), получим упрощенные уравнения, описывающие систему рис. 1:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[\varphi'_{де}(i_{гн},\ I)n+R-e'_г(i_{гн},\ I)]\frac{dI}{dt}+$$
$$+\frac{375}{GD^2}\varphi_{де}(i_{дн},\ I)\,\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)\,I=0; \qquad (4а)$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+\left[R-L\frac{\varphi'_{дм}(i_{дн},\ I)}{\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)}\frac{dI}{dt}\right]\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{дм}(i_{дн},\ I)\,\varphi_{де}(i_{дн},\ I)\,n-$$
$$-\frac{375}{GD^2}\varphi_{дм}(i_{дн},\ I),\ e_г(i_{гн},\ I)=0^*. \qquad (4б)$$

---

* После сказанного выше соответствующие функции в уравнениях (4а) и (4б) (например, $\varphi_{де}(i_{дн},\ I)$ рассматриваются как функции одного переменного I и постоянных параметров $i_г$, и $i_{дн}$, указывающих в данном случае на наличие в системе рис. 1 независимых обмоток возбуждения.

Рассмотрим частные случаи, вытекающие из уравнений (4а) и (4б)

1) Пусть в системе рис. 1 отсутствует обмотка независимого возбуждения генератора и $i_{гн}=0$; тогда из (4а) и (4б) получим уравнения, описывающие поведение системы „генератор — двигатель“ с генератором последовательного и двигателем смешанного возбуждений:-

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[\varphi'_{\partial e}(i_{\partial н}, I)n+R-e'_г(I)]\frac{dI}{dt}+$$
$$+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial e}(i_{\partial н}, I)\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)I=0; \tag{5а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+\left[R-L\frac{\varphi'_{\partial м}(i_{\partial н}, I)}{\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)}\frac{dI}{dt}\right]\frac{dn}{dt}+$$
$$+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)\varphi_{\partial e}(i_{\partial н}, I)n-\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)e_г(I)=0. \tag{5б}$$

2) Пусть теперь генератор не имеет последовательной обмотки возбуждения; тогда $e_г=\text{const}$ не зависит от I и $e'_г(I)=0$; при этом из (4а) и (4б) получим уравнения, описывающие поведение системы „генератор — двигатель“ с генератором независимого и двигателем смешанного возбуждений:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+\left[\varphi'_{\partial e}(i_{\partial н}, I)n+R\right]\frac{dI}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial e}(i_{\partial н}, I)\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)I=0; \tag{6а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+\left[R-L\frac{\varphi'_{\partial м}(i_{\partial н}, I)}{\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)}\frac{dI}{dt}\right]\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)\varphi_{\partial e}(i_{\partial н}, I)n-$$
$$-\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(i_{\partial н}, I)e_г(i_{гн})=0. \tag{6б}$$

3) Пусть двигатель не имеет независимой обмотки возбуждения, а генератор имеет смешанное возбуждение. Тогда $i_{\partial н}=0$ и из (4а) и (4б) получаем уравнения:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[\varphi'_{\partial e}(I)n+R-e'_г(i_{гн}, I)]\frac{dI}{dt}+$$
$$+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial e}(I)\varphi_{\partial м}(I)=0; \tag{7а}$$

и

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+\left[R-L\frac{\varphi'_{\partial м}(I)}{\varphi_{\partial м}(I)}\frac{dI}{dt}\right]\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(I)\varphi_{\partial e}(I)n-$$
$$-\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(I)e_г(i_{гн}, I)=0, \tag{7б}$$

описывающие систему „генератор — двигатель“ с генератором смешанного и двигателем последовательного возбуждений.

4) При отсутствии независимых обмоток возбуждения как у двигателя, так и у генератора $i_{гн}=0$ и $i_{\partial н}=0$ и из (4а) и (4б) имеем уравнения для системы „генератор — двигатель“ с машинами последовательного возбуждения:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[\varphi'_{\partial e}(I)n+R-e'_г(I)]\frac{dI}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial e}(I)\varphi_{\partial м}(I)I=0; \tag{8а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+\left[R-L\frac{\varphi'_{\partial м}(I)}{\varphi_{\partial м}(I)}\frac{dI}{dt}\right]\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(I)\varphi_{\partial e}(I)n-$$
$$-\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(I)e_г(I)=0. \tag{8б}$$

5) При отсутствии независимой обмотки возбуждения у двигателя и последовательной — у генератора из (4а) и (4б) получим уравнения для системы, состоящей из генератора независимого и двигателя последовательного возбуждений:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[\varphi'_{\partial e}(I)n+R]\frac{dI}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial e}(I)\varphi_{\partial м}(I)I=0; \tag{9а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+\left[R-L\frac{\varphi'_{\partial м}(I)}{\varphi_{\partial м}(I)}\frac{dI}{dt}\right]\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(I)\varphi_{\partial e}(I)n-$$

$$-\frac{375}{GD^2}\varphi_{\partial м}(I)e_г(i_{гн})=0. \tag{9б}$$

6) Пусть далее, у двигателя нет последовательной обмотки возбуждения, генератор же имеет смешанное возбуждение; пусть $i_{\partial н}=$ $=i_{\partial\, ком}$; тогда $\Phi_{\partial п}=0$, $\Phi_{\partial н}=\Phi_{\partial\, ком}$ и из (б) получаем:

$$e_\partial=\varphi_{\partial e}(i_{\partial н})n=c_e n, \tag{е}$$

откуда следует, что

$$\varphi_{\partial e}(i_{\partial н})=c_e=\text{const} \text{ и } \varphi'_{\partial e}(i_{\partial н})=\frac{dc_e}{dI}=0.$$

Точно так же из (д) следует, что

$$M=\varphi_{\partial м}(i_{\partial н},\ I)I=\varphi_{\partial м}(i_{\partial н})I=c_м I \tag{ж}$$

и, следовательно,

$$\varphi_{\partial м}(i_{\partial н})=c_м=\text{const} \text{ и } \varphi'_{\partial м}(i_{\partial н})=\frac{dc_м}{dI}=0;$$

тогда, используя (е) и (ж), из (4а) и (4б) получим уравнения для системы „генератор смешанного — двигатель независимого возбуждений:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[R-e'_г(i_{гн},\ I)]\frac{dI}{dt}+\frac{375}{GD^2}c_e c_м I=0; \tag{10а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+R\frac{dn}{dt}+\frac{375}{GD^2}c_м c_e n-\frac{375}{GD^2}c_м e_г(i_{гн},\ I)=0. \tag{10б}$$

7. При тех же условиях, что и в п. 6, но при отсутствии обмотки независимого возбуждения у генератора ($i_{гн}=0$) из (4а) и (4б) получим уравнения для системы „генератор с последовательным — двигатель с независимым возбуждениями“:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+[R-e'_г(I)]\frac{dI}{dt}+\frac{375c_м c_e}{GD^2}I=0; \tag{11а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+R\frac{dn}{dt}+\frac{375c_м c_e}{GD^2}n-\frac{375c_м}{GD^2}e_г(I)=0. \tag{11б}$$

8. Наконец, при генераторе и двигателе независимого возбуждения из (4а) и (4б) имеем уравнения:

$$L\frac{d^2I}{dt^2}+R\frac{dI}{dt}+\frac{375c_м c_e}{GD^2}I=0; \tag{12а}$$

$$L\frac{d^2n}{dt^2}+R\frac{dn}{dt}+\frac{375c_м c_e}{GD^2}n-\frac{375c_м}{GD^2}e_г(i_{гн})=0, \tag{12б}$$

из которых легко могут быть получены известные уравнения:

$$\frac{d^2I}{dt^2}+\frac{1}{T}\frac{dI}{dt}+\frac{1}{TB}I=0;$$

$$\frac{d^2n}{dt^2}+\frac{1}{T}\frac{dn}{dt}+\frac{1}{TB}n-\frac{1}{TB}\frac{e_г}{c_e}=0.$$

Различные варианты простой системы «генератор — двигатель», представленной на рис. 1, описанные уравнениями (4а)—(12б), представляют собой при $i_{гн}$=const и $i_{дн}$=const динамические системы с одной степенью свободы. Простейшая из них, описанная уравнениями (12а), (12б), является линейной системой, в связи с чем автоколебания в ней невозможны.

Следующая система [п. 7 и уравнения (11а), (11б)] является уже нелинейной, но простейшей, поскольку уравнение (11а) содержит один второй нелинейный член, нелинейность которого обусловлена видом характеристики намагничивания $e_г=e_г(I)$. За счет последней эта система допускает возможность возникновения автоколебаний, рассмотренных в [1, 2, 3, 4]. Как указывалось в цитированной литературе, эти автоколебания при малых индуктивностях могут сопровождаться реверсом двигателя, а при больших L могут оказаться односторонними (без перемены знака) относительно скорости двигателя.

Переход от системы п. 7 к системе п. 6 не вносит лишних нелинейностей и сопровождается переходом автоколебаний с реверсом двигателя в односторонние автоколебания; при больших ампер-витках независимой обмотки возбуждения генератора эти автоколебания могут исчезнуть совсем. Этот случай рассмотрен в [5].

Добавляя двигателю в системе п. 7 последовательную обмотку возбуждения, мы получаем систему, описанную в п. 1. Эта система является более сложной, так как содержит уже две нелинейности: во втором и третьем членах уравнения (5а). Как было указано в [6], в такой системе возникают автоколебания с реверсом двигателя и с неравными полупериодами, поскольку в одном полупериоде магнитный поток, характеризующий третий член в (5а), достигает наибольшей величины, а в другом — наименьшей.

Система, описанная в п. 4, является также автоколебательной, поскольку в (8а) имеется нелинейность при $\frac{dI}{dt}$, присущая характеристике намагничивания генератора. Третий член в (8а) также нелинеен, и эта система тоже содержит две нелинейности. Некоторые автоколебательные свойства этой системы описываются нами в статье «Об автоколебаниях в системе генератор — двигатель с машинами последовательного возбуждения», публикуемой в настоящем сборнике. Система, описанная в п. 3, являющаяся разновидностью системы, упомянутой в п. 4, является также автоколебательной в той мере, в какой независимая обмотка возбуждения генератора сохраняет нелинейность характеристики намагничивания генератора и, следовательно, нелинейность второго члена в (7а).

Система рис. 1 также сохраняет автоколебательные свойства, поскольку второй член в (4а) является нелинейным за счет характеристики намагничивания генератора; при этом она также является системой с двумя нелинейностями.

Что касается систем, описанных в п. 2 и 5, то в них автоколебания не наблюдаются, так как в них $e_г$ =const и в (6а) и (9а) нелинейность второго члена не обусловливается характеристикой намагничивания генератора.

В случае переменной индуктивности система рис. 1 явится системой второго порядка с одной степенью свободы, содержащей три нелинейности. Таким образом:

1) система рис. 1 является наиболее общим случаем простой автоколебательной системы «генератор — двигатель» с одной степенью свободы при тех допущениях, которые были изложены выше;

2) изучение автоколебаний в столь сложной системе целесообразно начинать с изучения простейшей системы, упомянутой в п. 7, постепенно усложняя задачу путем учета дополнительных нелинейностей.

Литература

1. Г а н д ж а Л. И., Физика колебаний в системе «генератор с последовательным — двигатель с независимым возбуждением», Изв. ТПИ, т. 76, 1954.

2. Г а н д ж а Л. И. и П о т е х и н Ю. И., О переходных процессах и колебаниях в системе «генератор с последовательным — двигатель с независимым возбуждением», Изв. ТПИ, т. 76, 1954.

3. Г а н д ж а Л. И., Линейная аппроксимация автоколебаний в электромеханической системе, Изв. ТПИ, т. 82, 1956.

4. Г а н д ж а Л. И., Влияние индуктивности на форму автоколебаний в электромеханической системе, Изв. ТПИ, т. 82, 1956.

5. Г а н д ж а Л. И. и С е в а с т ь я н о в В. А., Об автоколебаниях в электромеханической системе с электромашинным усилителем, Изв. ТПИ, т. 82, 1956.

6. Г а н д ж а Л. И., Самореверс как элемент электромашинной автоматики, диссертация, Томск, 1948.