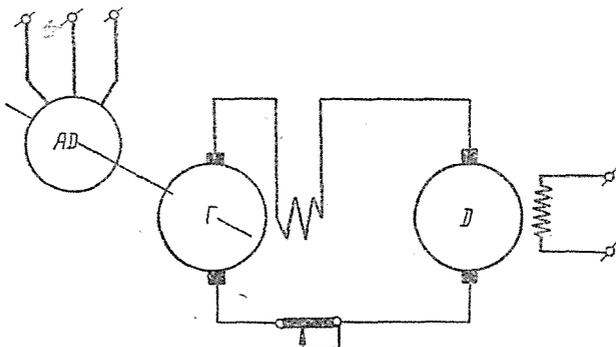


ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ НА ФОРМУ АВТОКОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Л. И. ГАНДЖА

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

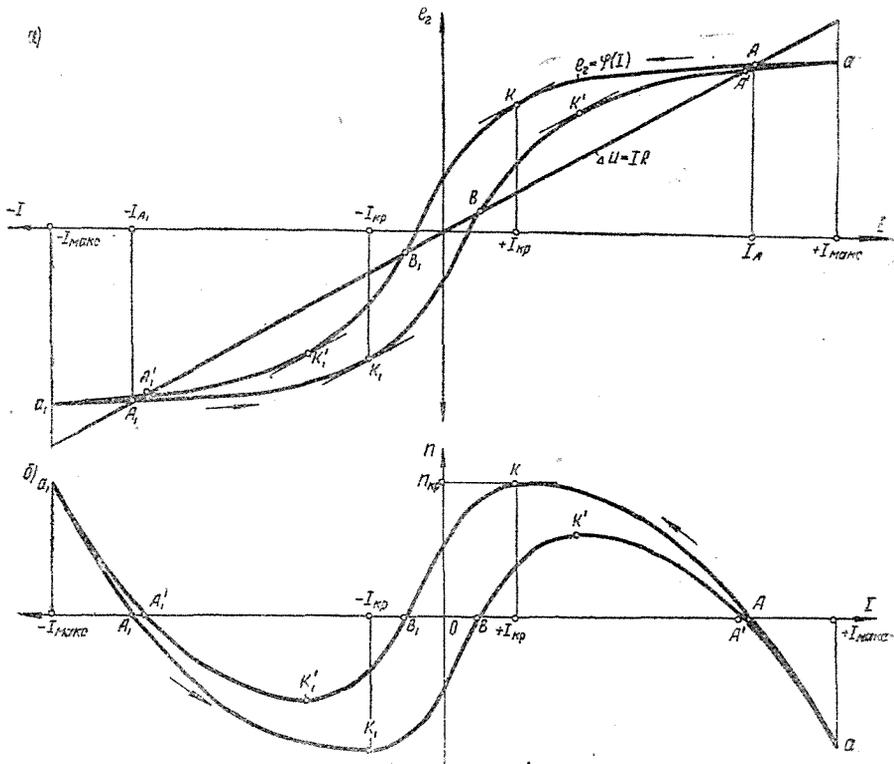
В [1] были рассмотрены автоколебания электромеханической системы, состоящей из генератора последовательного возбуждения, питающего двигатель независимого возбуждения (фиг. 1); при этом индуктивность силового контура полагалась равной нулю, в силу чего указанная система описывалась нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка. Было показано, что при такой идеализации в системе возможны „разрыв-



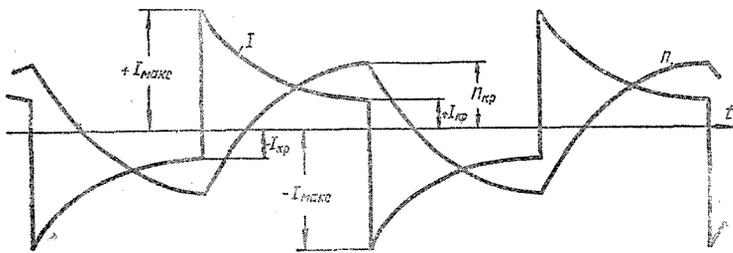
Фиг. 1.

ные“ колебания тока и непрерывные колебания скорости. В общих чертах механизм этих колебаний сводится к тому, что при уменьшении тока от $+I_{\text{макс}}$ до $+I_{\text{кр}}$ генератор размагничивается по участку ak петли гистерезиса (фиг. 2а), а двигатель разгоняется по участку ak его механической характеристики (фиг. 2б), который является участком устойчивой работы привода. Когда система достигнет точки k , она оказывается в режиме смены устойчивой работы на неустойчивую; при этом ток „скачком“ изменяется от значения $+I_{\text{кр}}$ до $-I_{\text{макс}}$ при постоянном значении скорости $n_{\text{кр}}$, и двигатель оказывается в тормозном режиме на устойчивом участке a_1A_1 его механической характеристики, а затем реверсируется и разгоняется в обратном направлении по участку A_1k_1 механической характеристики. Точка k_1 соответствует смене устойчивости, в силу чего ток при постоянной скорости „скачком“ меняется от $-I_{\text{кр}}$ до $+I_{\text{макс}}$ и т. д.

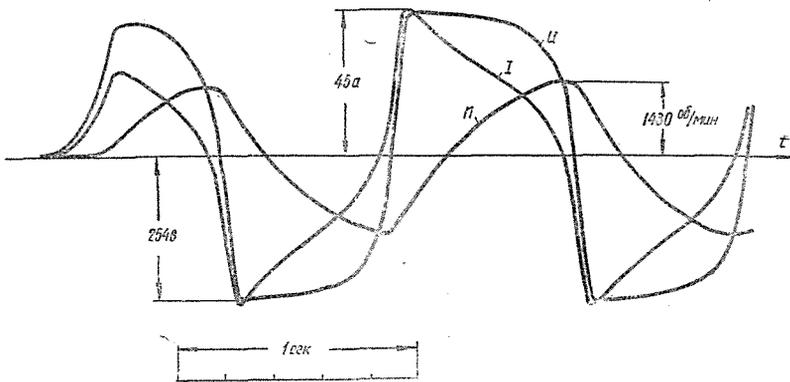
Эти „разрывные“ колебания тока и непрерывные колебания скорости представлены на фиг. 3. Учет индуктивности системы фиг. 1 приводит к невозможности возникновения „разрывных“ колебаний тока, поскольку ток „скачком“ измениться уже не может. Соответствующая этому случаю осциллограмма представлена на фиг. 4; индуктивность системы, соответствующая



Фиг. 2.

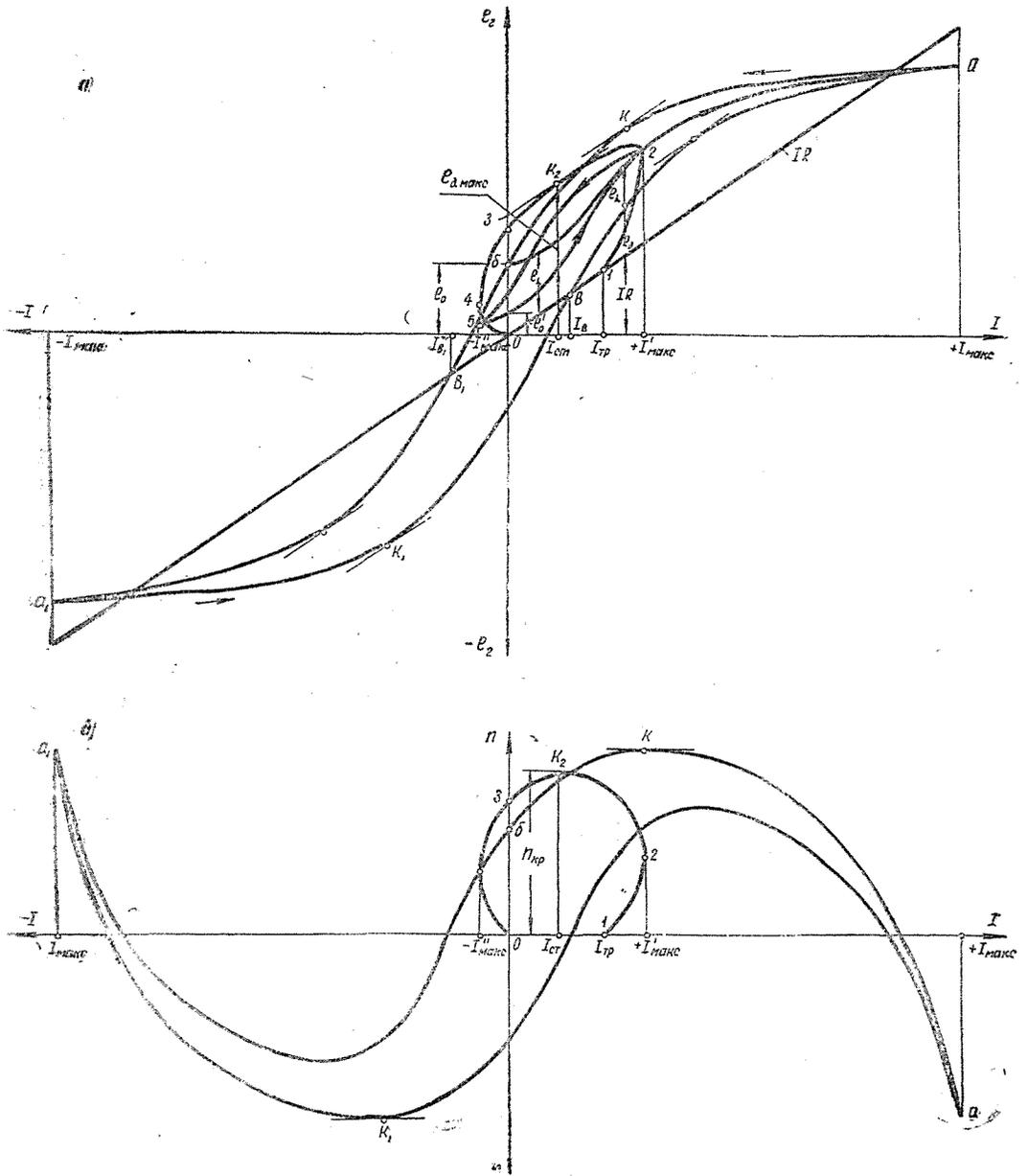


Фиг. 3.



Фиг. 4.

ющая этой осциллограмме, определялась только индуктивностями элементов машин. Рассмотрим более подробно влияние индуктивности на характер автоколебаний в рассматриваемой системе.



Фиг. 5.

На фиг. 5 а и б представлена гистерезисная петля генератора и соответствующая ей механическая характеристика двигателя системы фиг. 1 для случая „разрывных“ колебаний, ограниченные предельными значениями токов $+I_{\text{макс}}$ и $-I_{\text{макс}}$. Введем теперь в силовой контур рассматриваемой системы дополнительную достаточно большую индуктивность и изменением сопротивления реостата (фиг. 1) установим прежнее значение R полного

сопротивления контура так, чтобы прямая $I \cdot R$ (фиг. 5а) сохранила прежний угол наклона; это дает возможность проследить влияние L на форму автоколебаний системы при прочих неизменных условиях.

Рассматриваемая система описывается следующими уравнениями:

$$e_z = \psi(I) = R \cdot I + e_L + e_d, \quad (1)$$

$$M - M_{ст} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (2)$$

где

e_z, e_L, e_d — э.д.с. генератора, противо э.д.с. самоиндукции и противо э.д.с. двигателя;

$M, M_{ст}$ — моменты двигателя и статический, приложенный к валу двигателя и полагаемый в дальнейшем постоянным.

GD^2 — маховой момент двигателя.

Рассмотрим теперь с качественной стороны автоколебания, возникающие в системе с момента включения двигателя на генератор. После включения двигатель будет неподвижным до тех пор, пока ток не достигнет значения $+I_{тр}$, при котором происходит трогание двигателя (как известно [3] $I_{тр} > I_{ст}$). При этом $n = 0$ и $e_d = 0$, а (1) представляется в виде

$$e_z = R \cdot I + e_L. \quad (3)$$

Вместе с ростом тока начнет возрастать и e_z по первоначальной кривой $ба$ намагничивания; e_L при этом будет направлена навстречу току и e_z и представится как разность ординат кривой $ба$ и прямой $R \cdot I$. Когда ток достигнет $I_{тр}$, двигатель начнет разгоняться и вступит в силу уравнение (1); одновременно с ростом скорости двигателя ток продолжает возрастать до нового максимального значения $+I'_{макс.} < +I_{макс.}$, поскольку его величина обуславливается e_L , направленной попрежнему против I и e_z при увеличении тока до $+I'_{макс.}$. Из фиг. 5а e_d определится как разность ординат кривой 1—2, представляющей собой зависимость

$$e_z - e_L = R \cdot I + e_d \quad (4)$$

и прямой $R \cdot I$. Когда ток достигнет значения $+I'_{макс.}$, e_L станет равной нулю, поскольку при $I = I'_{макс.} \left(\frac{dI}{dt} \right)_{макс.} = 0$.

Таким образом, из (4) получим

$$e_z = R \cdot I + e_d, \quad (5)$$

что соответствует расположению точки 2 на кривой намагничивания $ба$. Начиная с точки 2, ток двигателя начинает убывать; при этом e_L будет направлена согласно с I и e_z так, что получим зависимость

$$e_z + e_L = R \cdot I + e_d, \quad (6)$$

определяющую кривую 2 k_3 3, располагающуюся выше кривой 2—5, по которой будет происходить размагничивание генератора в новом режиме. При убывании тока от $+I'_{макс.}$ скорость двигателя будет возрастать в соответствии с уравнением движения двигателя

$$M - M_{ст} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (7)$$

до тех пор, пока не достигнет максимального значения $n_{\text{макс.}}$, при котором

$$e_d = e_{d \text{ макс.}} = c_e \cdot n_{\text{макс.}} \text{ и } \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{макс.}} = 0;$$

при этом $M = M_{\text{ст}} = c_m \cdot I_{\text{ст}}$. На фиг. 5 а и б максимальной скорости соответствует точка k_2 на кривой 2- k_2 3, которая определяется проведением касательной к кривой, параллельной прямой $R.I$. Не трудно видеть, что точка k_2 динамической характеристики системы, аналогично точке k статической характеристики, является точкой, в которой нарушается устойчивость системы; в самом деле, поскольку для нее

$$n = n_{\text{макс.}} \text{ и } \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{макс.}} = 0,$$

то система в точке k_2 находится в режиме мгновенного установившегося движения; это значит, что система должна оказаться на статической характеристике. Таким образом, если точка k_2 (фиг. 5б) не располагается на статической механической характеристике, двигатель начнет тормозиться, стремясь попасть на участок $kб$ статической механической характеристики. Если же точка k_2 совпадает с участком $kб$, то система окажется в неустойчивом режиме и будет стремиться к устойчивому движению, которому соответствует участок $a_1 k_1$ статической характеристики. Таким образом, в обоих случаях скорость двигателя начнет уменьшаться при уменьшающемся токе двигателя. Значения скорости при этом могут быть найдены из выражения

$$e_d = c_e \cdot n, \quad (8)$$

левая часть которого находится в соответствии с (6) как разность ординат кривой k_2 3 и прямой $R.I$. Когда ток станет равным нулю, из (6) будем иметь:

$$e_2 + e_L = e_d. \quad (9)$$

При дальнейшем убывании тока, когда он начнет принимать отрицательные значения, из (6) получим

$$e_2 + e_L = -R \cdot I + e_d, \quad (10)$$

откуда следует, что e_2 и e_L направлены против тока и что e_d становится источником тока. Поскольку n двигателя и e_d уменьшаются, то увеличение тока в область отрицательных значений станет возможным до некоторого максимального значения $-I''_{\text{макс.}}$ так, что

$$|I''_{\text{макс.}}| < |I'_{\text{макс.}}|. \quad (11)$$

В самом деле, источником тока при изменении его в области положительных значений являлась e_2 ; при этом увеличению тока до $+I'_{\text{макс.}}$ соответствовало увеличение e_2 ; источником же тока при изменении его в области отрицательных значений является e_d , причем увеличению тока до $-I''_{\text{макс.}}$ соответствует не увеличение, а уменьшение e_d ; отсюда следует, что абсолютные значения максимальных токов в положительной и отрицательной областях значений должны удовлетворять неравенству (11). При дальнейшем уменьшении тока от $-I''_{\text{макс.}}$ до нуля скорость будет попрежнему уменьшаться, поскольку отрицательный ток обусловит тормозной момент двигателя; при $I=0$ скорость станет также равной 0, и кривая 3-4-0, описываемая уравнением (10), придет в начало координат. На этом закончится первый период колебания системы с большой индуктивностью. За этот период генератор, имевший э.д.с от остаточного магнетизма e_0 , пройдет процесс намагничивания по кривой б-2 и размагничивания по кривой 2-5.

в соответствии с направлением, указанным стрелкой (точка 5 соответствует $-I''_{\text{макс.}}$). Когда ток в процессе уменьшения от $-I''_{\text{макс.}}$ станет равным нулю, генератор будет иметь э.д.с. от остаточного магнетизма e'_0 , под влиянием которой произойдет намагничивание генератора по кривой 5—2 во втором периоде колебаний.

В [1] было показано, что автоколебания, сопровождающиеся реверсом двигателя, возможны в системе (фиг. 1) в том случае, если отрицательный ток в процессе изменения по абсолютной величине может превзойти значение тока I_{B_1} , соответствующего точке B_1 неустойчивого равновесия системы. Если же система обладает настолько значительной индуктивностью, что абсолютные значения токов $-I_{B_1}$ и $-I''_{\text{макс.}}$ удовлетворяют неравенству

$$|I''_{\text{макс.}}| < |I_{B_1}|,$$

то в этой системе возникают колебания, не сопровождающиеся реверсом двигателя. Таким образом, индуктивность в значительной мере влияет на форму автоколебаний системы фиг. 1 и может обусловить возникновение прерывистых колебаний скорости. Так как индуктивность ограничивает и пиковые значения токов, то перемагничивание генератора будет происходить уже по суженной петле гистерезиса. Вместе с тем уравнения (1, 3, 4, 5, 6, 9, 10) показывают, что генератор системы фиг. 1 может быть заменен некоторым эквивалентным генератором, электродвижущая сила которого равна

$$e_{\text{гэк}} = e_2 \pm e_L.$$

Поскольку $e_L = L \frac{dI}{dt}$, где как L , так и $\frac{dI}{dt}$ являются функциями тока, то e_L — может быть представлена некоторой функцией тока $e_L = \psi(I)$.

Тогда

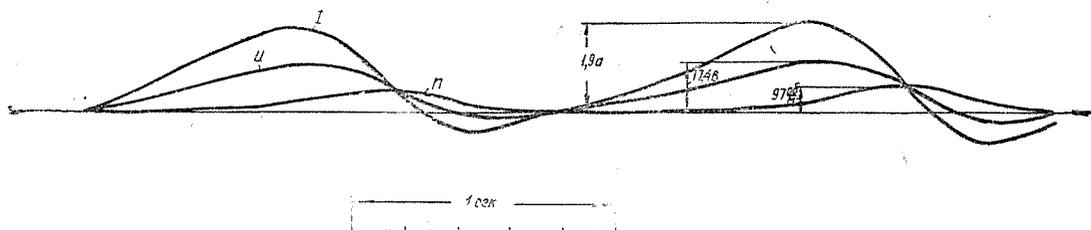
$$e_{\text{гэк}} = \varphi(I) \pm \psi(I) = F(I)$$

и указанные выше уравнения (1, 3, 4, 5, 6, 9, 10) могут быть заменены одним уравнением общего вида

$$e_{\text{гэк}} = F(I) = R \cdot I + e_0. \quad (12)$$

Функция $F(I)$ является кривой намагничивания эквивалентного генератора, которая на фиг. 5 представлена кривой 0—1—2— k_2 —3—4—0. Из фиг. 5а и из (12) следует, что максимальное значение противо э.д.с. e_0 макс. может быть определено проведением касательной к кривой 0—1—2— k_2 —3—4—0, параллельной прямой $R \cdot I$. Эта касательная и определяет точку k_2 , аналогичную точке k для системы с $L=0$, допускающей разрывные колебания тока. Из всего сказанного следует, что точка k_2 располагается ближе к оси ординат, нежели точка k . Таким образом, индуктивность контура системы фиг. 1 способствует повышению ее устойчивости при малых нагрузках. Если считать, что первое колебание, возникающее в системе после включения двигателя, соответствует положительным значением тока, то абсолютные значения максимальных токов в нечетных полупериодах будут больше абсолютных значений максимальных токов в четных полупериодах кривой тока. Соответственно сказанному в нечетных полупериодах кривой скорости последняя будет изменяться, проходя максимальное значение; в четных полупериодах той же кривой скорость будет равна нулю при условии $|I''_{\text{макс.}}| < |I_{\text{тр}}|$. Осциллограмма описанных колебаний представлена на фиг. 6; эта осциллограмма была снята для той же системы, что и осциллограмма фиг. 4, но в последовательную цепь якорей машин

была включена значительная индуктивность в виде катушки с железом. Прочие же условия опыта оставались неизменными, в том числе и R .



Фиг. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганджа Л. И. Физика колебаний в системе „Генератор с последовательным—двигатель с независимым возбуждением“. Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, том 76, 1953.

2. Ганджа Л. И. и Потехин Ю. И. „О переходных процессах и колебаниях в системе“ „Генератор с последовательным—двигатель с независимым возбуждением“. Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, том 76, 1953.

3. Попов В. К. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1945.