

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЧКОВ СЛУЧАЙНОЙ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЕМНИКЕ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОВОЗЕ ДЭ 1

Розроблена математична модель електровоза постійного струму ДЕ 1 для дослідження впливу штовхоподібної зміни напруги на струмоприймачі на перехідні електромагнітні процеси. Проведено числові розрахунки магнітного потоку, струмів.

Разработана математическая модель электровоза постоянного тока ДЭ 1 для исследования влияния толчкообразного изменения напряжения на токоприемнике на переходные электромагнитные процессы. Произведен численный расчет магнитного потока, токов.

A mathematical model of DC electric locomotive series DE 1 has been developed for study of the influence of jolt-like voltage changes on the pantograph on transitional electromagnetic processes. The authors have made numeric calculation of the magnetic flow and the currents involved.

Електровозы постоянного тока ДЭ 1, как и весь электроподвижной состав (ЭПС), эксплуатируются в условиях резкого изменения напряжения на их токоприемниках. Согласно нашим исследованиям, наиболее часто (с вероятностью 0,53) встречаются толчки – возрастание напряжения  $\Delta U$  величиной 300...500 В, что

составляет 10...16,7 %  $U_{nom}$  (рис. 1). Несомненно является актуальным расчет переходных электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза с учетом таких изменений напряжения. Автору неизвестны публикации с результатами исследований на такую или подобную тему.

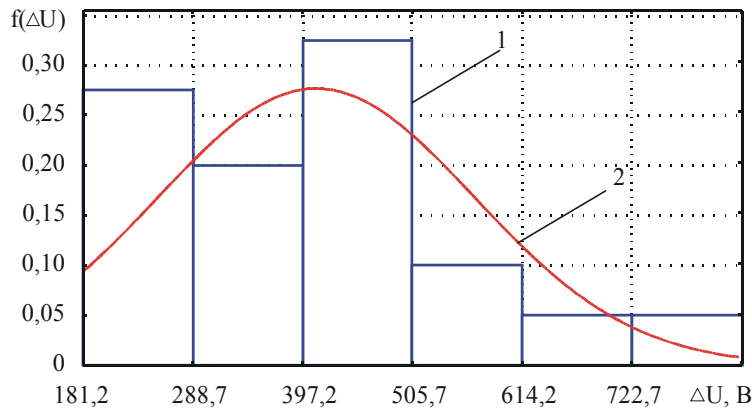


Рис. 1. Статистический (1) и теоретический (2) законы распределения случайного процесса  $\Delta U(t)$

С точки зрения электрических систем электровоз представляет собой нелинейную динамическую стохастическую систему, на вход которой подается одно внешнее воздействие – напряжения на токоприемнике  $U$ . Приложенное напряжение, являясь по роду постоянным, представляет собой непрерывно изменяющуюся функцию, зависящую от времени, т.е. случайную функцию.

Для анализа переходных процессов с учетом вихревых токов была разработана математическая модель электровоза в режиме тяги на параллель-

ном соединении тяговых двигателей при различных степенях ослабления поля  $\beta$ . С учетом принятой схемы замещения тягового электродвигателя (ТЭД) (рис. 2) эта модель имеет вид:

$$i_{\text{я}} = i_{\text{в}} + i_{\text{ш}},$$

$$2R_{\text{в}}i_{\text{в}} + 2 \cdot 2p\sigma_{\text{в}}w_{\text{в}} \frac{d\Phi}{dt} +$$

$$+ 2R_{\text{я}}i_{\text{я}} + 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 2e(t) = U,$$

$$2R_B i_B + 2 \cdot 2p\sigma_B w_B \frac{d\Phi}{dt} - R_{ш} i_{ш} - L_{ш} \frac{di_{ш}}{dt} = 0,$$

$$2\sigma_{Bx} w_{Bx} \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{Bx}(t) i_{Bx} = 0,$$

$$w_B i_B + w_{Bx} i_{Bx} = w_B i_{\mu},$$

или при условии, что  $w_B = w_{Bx}$

$$i_B + i_{Bx} = i_{\mu},$$

где и на рис. 2  $i_{я}$ ,  $i_B$ ,  $i_{ш}$ ,  $i_{Bx}$  – токи соответственно в обмотке якоря, обмотке возбуждения, шунтирующем контуре, вихревой;  $R_{дг}$  – активное сопротивление дуги;  $R_{я}$  – активное сопротивление якоря;  $R_B$  – активное сопротивление обмотки возбуждения;  $R_{ш}$  – актив-

ное сопротивление шунта;  $R_{Bx}$  – активное сопротивление вихревого контура;  $p$  – число пар полюсов обмотки главных полюсов двигателя;  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{Bx}$  и  $w_B$ ,  $w_{Bx}$  – коэффициенты рассеивания и число витков соответственно обмотки возбуждения (главных полюсов) и контура вихревых токов;  $i_{\mu}$  – ток намагничивания станины, который является нелинейной функцией  $\Phi$ :

$$i_{\mu} = 33,601 - 2536,387\Phi(t) + 2,518 \cdot 10^5 \Phi^2(t) - 4,031 \cdot 10^6 \Phi^3(t) + 2,269 \cdot 10^7 \Phi^4(t);$$

$\Phi$ ,  $\Phi_{s.B}$ ,  $\Phi_{s.Bx}$  – магнитные потоки соответственно основной (станины), рассеивания в обмотке возбуждении, вихревом контуре.

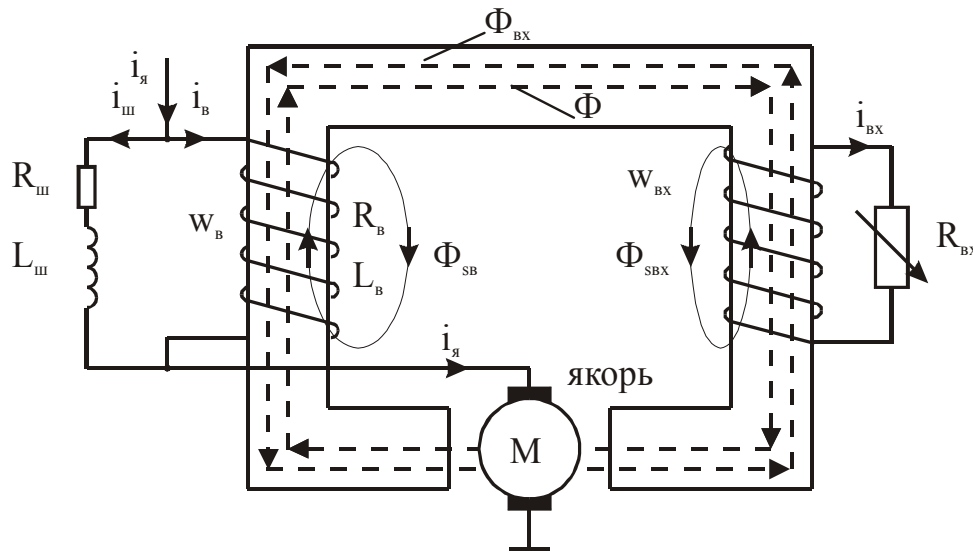


Рис. 2. Электромагнитная схема замещения тягового двигателя

Учет вихревого тока, возникающего в станине и в сердечнике главных полюсов тяговых двигателей, осуществлен эквивалентным короткозамкнутым контуром с количеством витков  $w_B = w_{Bx}$  и активным сопротивлением  $R_{Bx}$ . Последнее является переменной величиной, зависящей от времени развития переходного процесса, вследствие постепенного проникновения вихревых ЭДС и токов от периферийных частей магнитопровода вглубь его.

Согласно [1]  $R_{Bx}$  рассчитывается по формуле

$$R_{Bx}^{HP}(t) = \frac{6w_B^2}{\sigma_B A \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{HP}}}\right)},$$

где  $A$  – коэффициент, определяемый как:

$$A = \sum \frac{V_i}{\rho_i \left(\frac{a_i + b_i}{b_i} + \frac{b_i}{a_i}\right)},$$

где  $V_i$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  – объем, размеры сечения  $i$ -й части магнитопровода;  $T_{HP}$  – постоянная времени нарастания магнитного потока, равная [1]:

$$T_{HP} = \frac{2,7p\sigma_B w_B}{C},$$

где  $C$  – постоянная двигателя,

$$C = \frac{Npn}{60a}.$$

Переходные процессы в двух последовательно соединенных тяговых двигателях определяются в основном характером изменения магнитного потока  $\Phi(t)$ , который влияет на  $i_{я}$ ,  $i_{в}$ ,  $i_{ш}$  и  $i_{вх}$ .

На (рис. 3, а–д) в качестве примера представлены результаты численных расчетов электромагнитных процессов при степени ослабления  $\beta = 0,57$  (ОП 3) и разных начальных условиях тока якоря

$$I_{я.нач} = (0,25; 0,5; 1; 1,1) I_{я.ном}$$

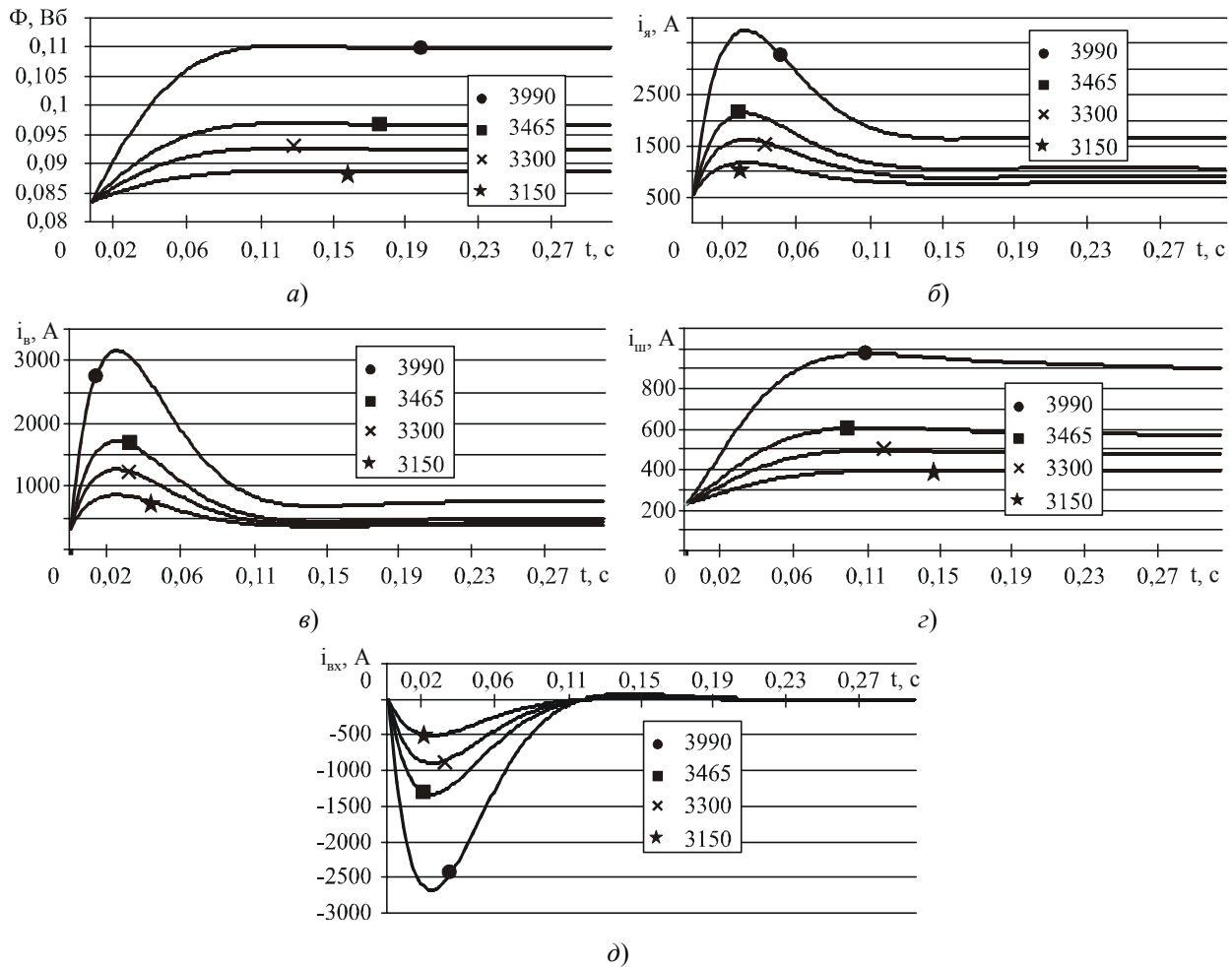


Рис. 3. Временные зависимости изменения переходных магнитного потока  $\Phi$  (а), тока якоря  $i_{я}$  (б), тока обмотки возбуждения  $i_{в}$  (в), тока шунтирующей цепи  $i_{ш}$  (г) и вихревых токов  $i_{вх}$  (д) при различных возможных скачкообразных изменениях напряжения

Вероятность появления толчков, т. е. максимальных значений тока якоря

$$I_{я.мах} = 803,4 \dots 1392 A$$

при различных степенях ослабления поля, а также различных толчках напряжения, составляет 0,3, а вероятность появления максимальных значений

$$I_{я.мах} = 3158,8 A$$

а также при различных возможных скачкообразных изменениях напряжения на токоприемнике

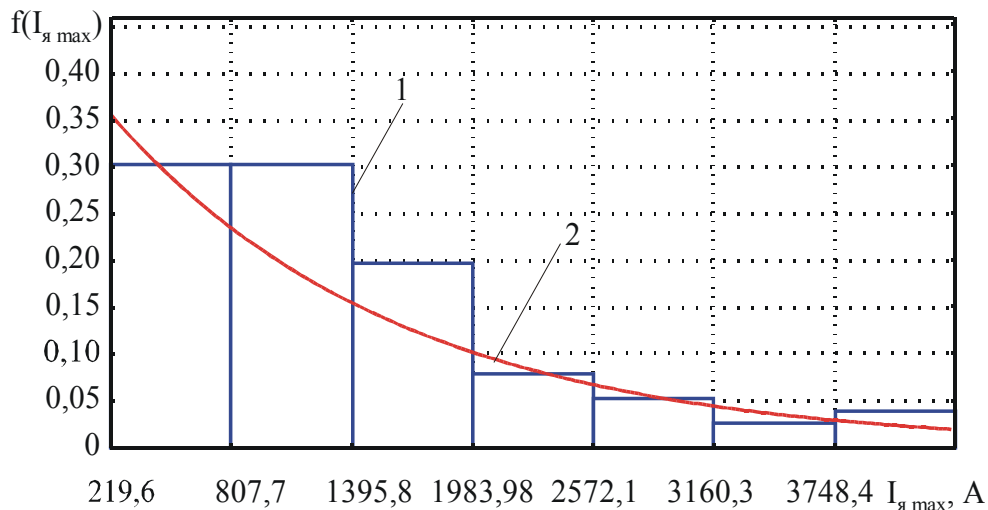
$$\Delta U = (0,05; 0,1; 0,155; 0,33) U_{ном}$$

При этом следует заметить, что в реальных условиях эксплуатации электровозов ДЭ 1 на участках Приднепровской дороги толчки напряжения  $0,33U_{ном}$  и выше не зафиксированы, но анализируются в данной работе как на возможное значение согласно [2].

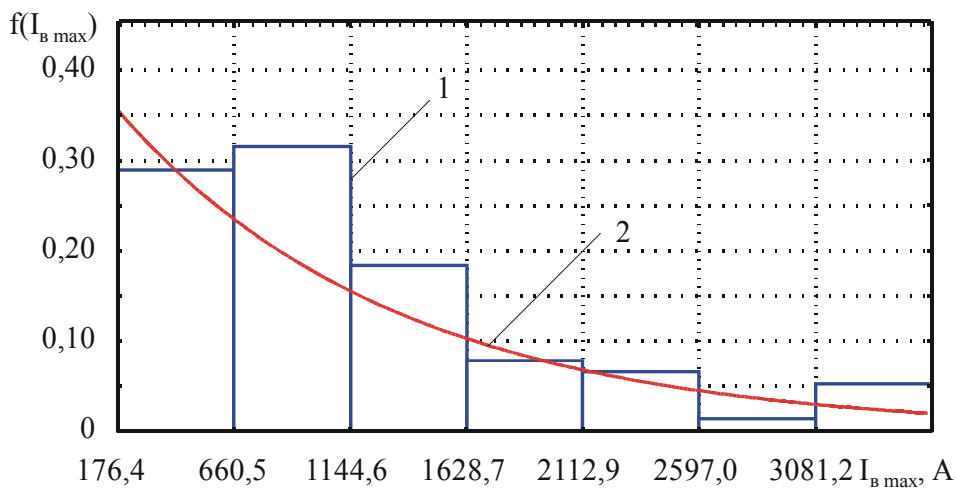
и выше составляет 0,05...0,05 (рис. 4, а). Вероятность появления максимальных значений тока возбуждения

$$I_{в.мах} = 660,5 \dots 1144,6 A$$

составляет 0,32, а  $I_{в.мах} = 2594 A$  и выше до 0,05 (рис. 4, б). Такие вероятности появления бросков токов дают основание для анализа переходных процессов в электровозе с целью определения вероятных причин отказов ТЭД.



а)



б)

Рис. 4. Статистический (1) и теоретический (2) законы распределения бросков тока якоря (а) и тока возбуждения (б) при различных степенях возбуждения поля и толчках напряжения

На рис. 5–6, а, б приведены зависимости от-  
ношений

$$\frac{I_{я. max}}{I_{ном}}$$

в функции

$$\frac{I_{я. нач}}{I_{ном}}$$

при

$$\beta = 1, \quad \beta = 0,57,$$

т. е. в режиме ПП (рис. 5) и ОП 3 (рис. 6, а, б) при различных величинах толчков  $\Delta U$  и начального значения тока  $I_{я. нач}$ , из которых следует:

Относительное значение максимального тока якоря значительно изменяется при толчкообразном изменении напряжения  $U$  и величине  $I_{я. нач}$ . Так, при

$$I_{я. нач} = I_{я. ном}, \quad \Delta U = 0,05U_{ном}, \quad \beta = 0,57$$

максимальное значение тока составляет

$$I_{я. max} = 1,75I_{я. ном};$$

при тех же начальных условиях и степени ослабления, но при

$$\Delta U = 0,33U_{ном} \quad I_{я. max} = 6,55I_{я. ном}.$$

Аналогично толчок тока в обмотке возбуждения (рис. 6, а, б) составляет

$$I_{в. max} = 1,75I_{я. ном}$$

при

$$\Delta U = 0,05U_{ном}, \quad I_{в. max} = 5,8I_{я. ном}$$

при

$$\Delta U = 0,33U_{ном}.$$

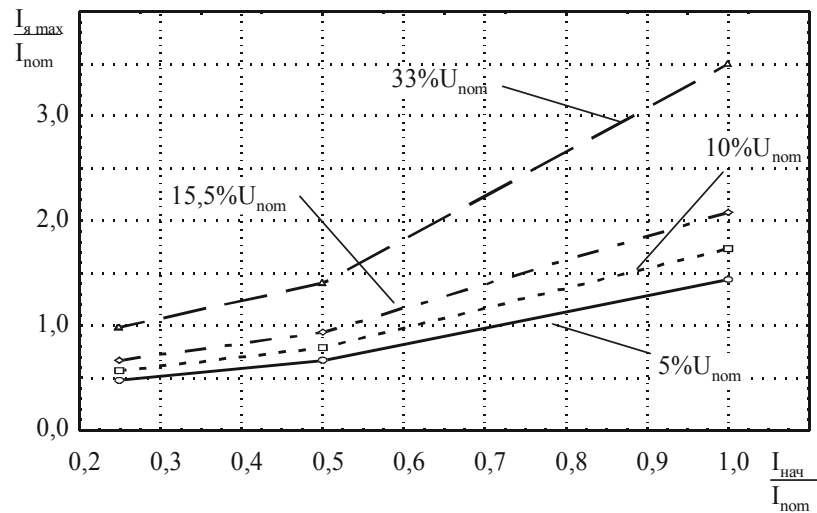
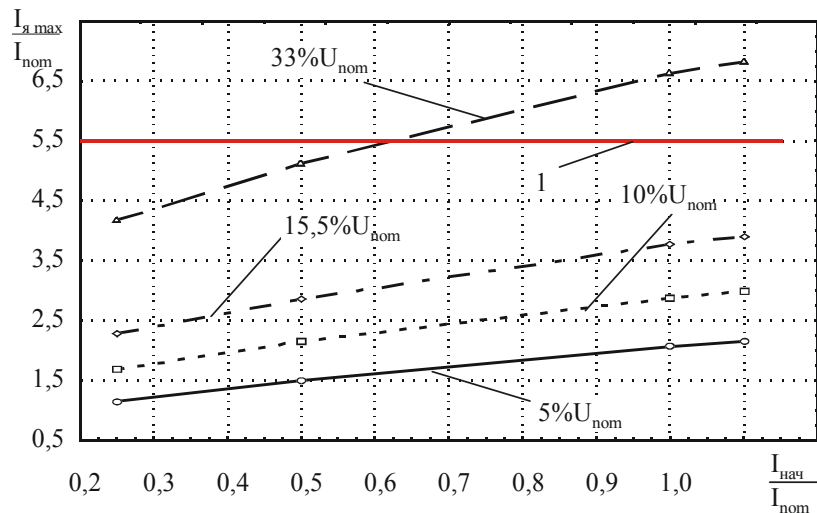
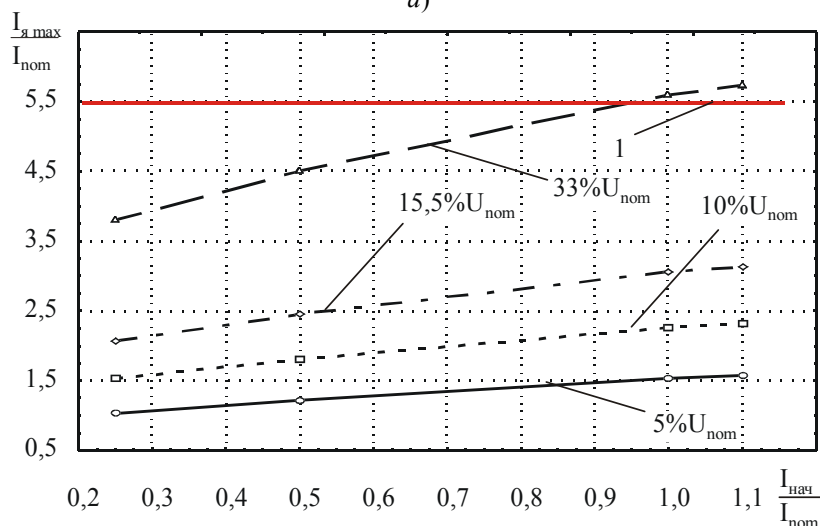


Рис. 5. Графики зависимости кратности токов  $\frac{I_{в.маx}}{I_{ном}} = \frac{I_{я.маx}}{I_{ном}} = f\left(\frac{I_{я.нач}}{I_{ном}}\right)$  при полном поле и различных скачкообразных изменениях напряжения и начальных значениях тока



а)



б)

Рис. 6. Графики зависимости кратности токов якоря (а) и возбуждения (б)  $\frac{I_{я.маx}}{I_{ном}} = f\left(\frac{I_{я.нач}}{I_{ном}}\right)$  при ослаблении поля (ОП 3) и различных скачкообразных изменениях напряжения и начальных значениях тока. 1 – граница возникновения кругового огня

Такое появление максимальных токов в силовой цепи двигателя обуславливается возникновением значительной разницы между противо-ЭДС и напряжением питания тяговых двигателей, что приводит к увеличению падения напряжения в обмотке возбуждения (по сравнению со стационарным режимом) и стремлению главного магнитного потока машины увеличиваться. Рост потока во время переходного режима сдерживается демпфирующим действием вихревых токов в сплошных участках магнитопровода, а при использовании ОП еще и демпфирующим действием контура «обмотка возбуждения – цепь ослабления поля».

По мере увеличения начальной скорости изменения тока величина отставания потока увеличивается и противо-ЭДС при максимальном токе уменьшается. Изменение потока во времени, по сравнению с изменением тока, существенно отстает. Следовательно, при достижении током максимума величина противо-ЭДС будет меньше, чем при работе машины в стационарном режиме на максимальном напряжении, т. е. в режиме толчка напряжения [2].

При  $\beta = 1$  и толчке напряжения

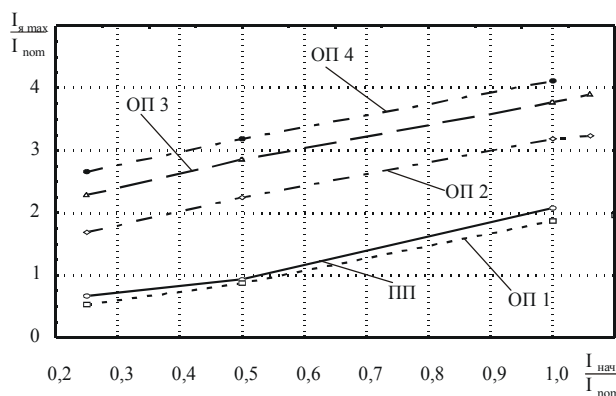
$$\Delta U = 15,5 \% U_{nom}$$

кратность тока практически изменяется в пределах  $1,45 \dots 2,1 I_{я. nom}$ . При толчке (см. рис. 5)

$$\Delta U = 33 \% U_{nom} \quad I_{я. max} = 3,5 I_{я. nom}$$

Из сравнения кратности толчков тока якоря при  $\beta = 1$  (см. рис. 5) и  $\beta = 0,57$  (см. рис. 6), равных

$$I_{я. max} = 3,5 I_{я. nom}, \quad I_{я. max} = 6,55 I_{я. nom}$$



а)

при

$$\Delta U = 33 \% U_{nom}, \quad I_{я. нач} = I_{я. nom}$$

видно, что максимальное значение тока на 18,7 % выше в случае применения индуктивного шунта.

Рассматривая влияние индуктивного шунта при разных степенях ослабления поля, на максимальное значение тока якоря, видим, что кратность тока якоря увеличивается с уменьшением степени ослабления поля, например, при начальных условиях

$$I_{я. нач} = I_{я. nom}, \quad \Delta U = 15,5 \% U_{nom}$$

кратность (рис. 7, а, б) составляет:

- на ОП 1

$$I_{я. max} = 1,75 I_{я. nom}, \quad I_{в. max} = 1,23 I_{в. nom};$$

- на ОП 4

$$I_{я. max} = 4,1 I_{я. nom}, \quad I_{в. max} = 3,2 I_{в. nom}.$$

Аналогично (рис. 8, а, б) при

$$\Delta U = 33 \% U_{nom}$$

получено:

- на П – ОП 1

$$I_{я. max} = 3,1 I_{я. nom}, \quad I_{в. max} = 2,25 I_{в. nom};$$

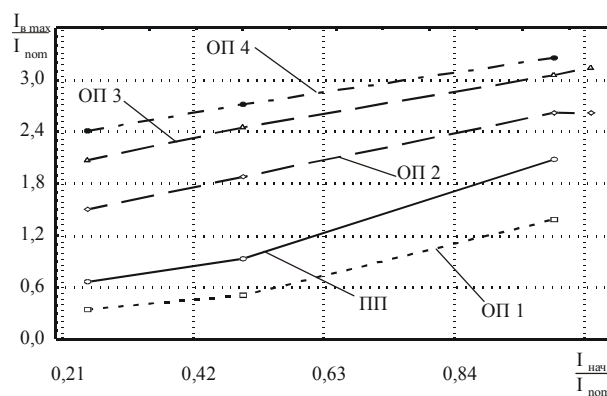
- на П – ОП 4

$$I_{я. max} = 7,4 I_{я. nom},$$

$$I_{в. max} = 6,05 I_{в. nom},$$

что в 1,8 раза больше тока якоря, чем при

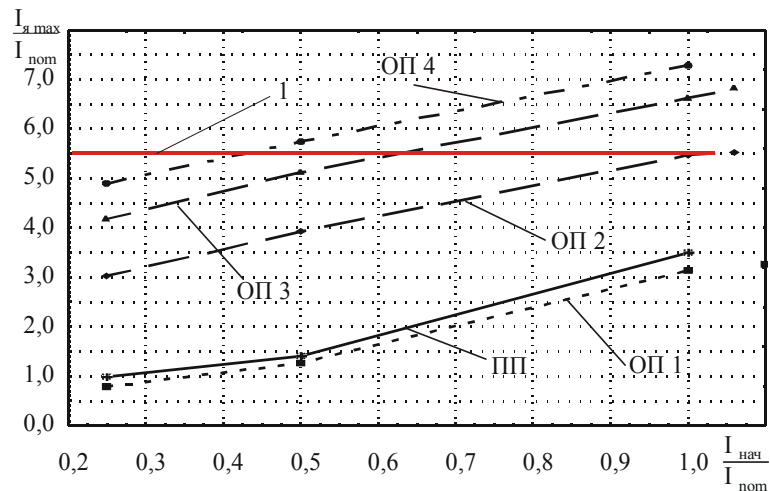
$$\Delta U = 15,5 \% U_{nom}.$$



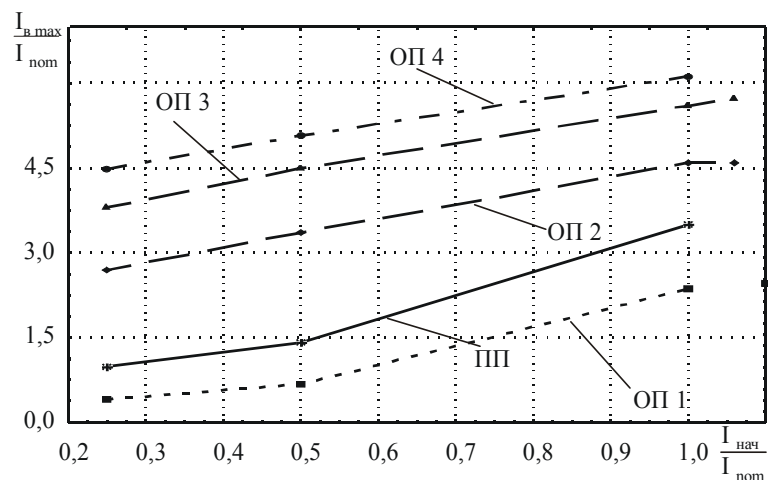
б)

Рис. 7. Графики зависимости кратности бросков токов якоря (а) и возбуждения (б)  $\frac{I_{я. max}}{I_{nom}} = f \frac{I_{я. нач}}{I_{nom}}$

при различном ослаблении поля и  $\Delta U = 15,5 \% U_{nom}$



а)



б)

Рис. 8. Графики зависимости кратности бросков токов якоря (а) и возбуждения (б)  $\frac{I_{я.мах}}{I_{ном}} = f \frac{I_{нач}}{I_{ном}}$  при различном ослаблении поля и  $\Delta U = 33\%U_{ном}$ . 1 – граница возникновения кругового огня

### Выводы

Толчки питающего напряжения являются опасным режимом для узлов тяговых двигателей, так как максимальные значения тока якоря могут достигать  $5,5 \dots 7,75 I_{я.ном}$  при

$$\Delta U = 33\%U_{ном},$$

$$I_{я.нач} = I_{я.ном} = 565 \text{ А},$$

что составляет 3091,9 и 4120,1 А соответственно (рис. 8, а). Практика показывает, что возникающие в силовых цепях электровозов скачкообразные переходные токи носят тяжелый характер. Переходные процессы ухудшают коммутационные и потенциальные условия на коллекторе тяговых двигателей, вследствие чего на них возникает круговой огонь уже при 5,5...6-кратном увеличении тока якоря. В ре-

зультате, последствия изменения напряжения могут вызвать перекрытие изоляционных промежутков на щеткодержателях и корпусах коллекторов, что обуславливает пробой на корпус коллектора. Такие пробой на корпус одного из последовательно включенных тяговых электродвигателей вызывают повышенное напряжение на коллекторах других тяговых двигателей, что может привести к выходу из строя целой группы ТЭД.

Значительная опасность режима при  $\beta = 1$  и малое влияние на протекание электромагнитных процессов параметров цепи шунтирования возбуждения показывают, что определяющими факторами являются начальные условия.

Влияние индуктивного шунта на толчкообразное изменение токов малоэффективно, так как из-за насыщения магнитной системы двигателя,

$$\frac{\partial \psi_{\text{в}}}{\partial t}$$

мало отличается от

$$\frac{\partial \psi_{\text{ш}}}{\partial t},$$

где  $\psi_{\text{в}}$  и  $\psi_{\text{ш}}$  – магнитные потокоцепления обмотки возбуждения и индуктивного шунта.

Разработанная математическая модель позволяет производить многофакторный анализ динамических процессов в силовых цепях любого вида электроподвижного состава.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рунов Ю. А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава. // Труды ЦНИИ МПС. – 1974. – Вып. 516. – С. 78–92.
2. Лозановский А. Л. Оценка максимальной допустимой величины токов тяговых двигателей элктровозов в нестационарных режимах. // Электровозостроение. – 1966. – Т. 7. – С. 59–67.

Поступила в редколлегию 27.05.2005.