

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПРИ РЕЗКОМ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЁМНИКЕ

Костин Н.А., д.т.н., проф., Мищенко Т.Н., Гилевич О.И., к.т.н., доц.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
Украина, 49010, Днепропетровск, ул. ак. В Лазаряна, 2, ДНУЖТ, кафедра "ТОЭ"
тел. (0562) 7761-237

Запропоновано метод імовірнісного аналізу стохастичних електромагнітних процесів в силових колах електрорухомого складу. Виконані і проаналізовані результати чисельних розрахунків процесів в аварійному режимі зняття та подальшого відновлення напруги на струмоприймачі першого українського електровоза постійного струму ДЕ 1.

Предложен метод вероятностного анализа стохастических электромагнитных процессов в силовых цепях электроподвижного состава. Выполнены и проанализированы результаты численных расчётов процессов в аварийном режиме снятия и последующего восстановления напряжения на токоприёмнике первого украинского электровоза постоянного тока ДЭ 1.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Без детального анализа и чёткого знания нормальных и аварийных переходных электромагнитных процессов, протекающих в силовых цепях электроподвижного состава (ЭПС) невозможен процесс создания новых и надёжная безаварийная эксплуатация и ремонт существующего, в том числе и электровозов. А точный расчёт должен учитывать реально действующие факторы.

На вход нелинейной динамической стохастической системы, которую представляет собой электровоз, с точки зрения теории электрических систем, подаётся одно внешнее воздействие – напряжение на токоприёмнике U . Приложенное напряжение U , является постоянным, характеризуется большими непрерывными колебаниями во времени, то есть, представляет собой случайной функцией времени. На рис. 1 приведены реализации напряжения на токоприёмниках электровозов постоянного тока, эксплуатирующихся на Приднепровской железной дороге.

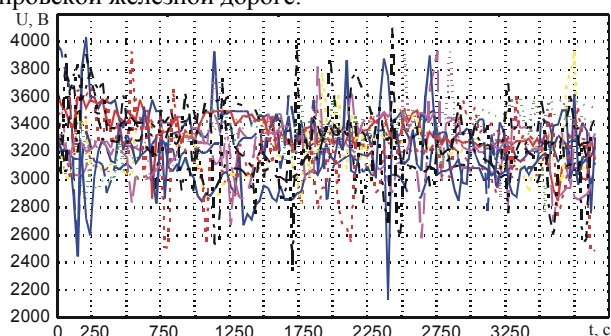


Рис. 1. Реализации напряжения на токоприёмниках электровозов постоянного тока, эксплуатирующихся в Украине

При анализе этих реализаций $U(t)$ (рис. 1) и данных табл. 1 видно, что при номинальном напряжении, равном 3000В, фактические его значения изменяются в пределах от 2131 до 4100В при среднем 3262В. Анализ этих реализаций $U(t)$ (рис. 1) и данные табл. 1 показывают, что при номинальном напряжении, равном 3000В, фактические его значение изменяются в пределах: 2131-4100В при среднем 3262В. Однородный характер колебаний $U(t)$ (рис. 1), а также постоянство во времени функций математического ожидания $m_U(t)$ и дисперсии $D_U(t)$ дают основание считать напряжение $U(t)$ стационарным случайным процессом. Одновременно, вид гистограммы (рис. 2), незначительные величины коэффициентов асимметрии и эксцесса (табл. 1), а также величина вероятности $p=0,15$ (по критерию Пирсона) позволяют считать, что одномерным (в пересечении t_k) распределением напряжения $f(U, t_k)$ есть закон Гаусса с параметрами, приведенными в табл. 1.

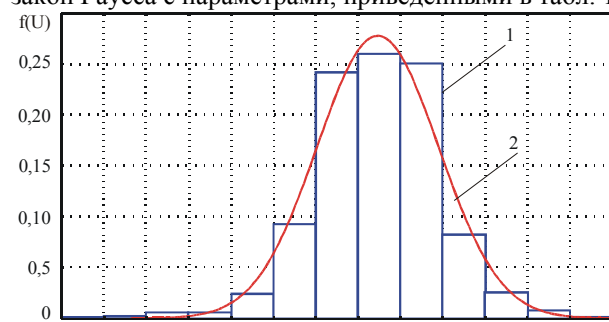


Рис. 2. Гистограмма (1) и теоретический закон (2) распределения случайного процесса $U(t)$

Таблица 1

Вероятностные функции одномерного распределения напряжения на токоприёмнике.

Параметры	$m_U(t)$, В	$D_U(t)$, В ²	$\sigma_U(t)$, В	A_S , от.ед.	E_X , от.ед.
Значение	3270	34970	187	-0,21	-0,11

Учитывая такой характер, $U(t)$ задача расчета стохастических переходных электромагнитных процессов ставится следующим образом: задана нелинейная динамическая система (электровоз), к входу которой прикладывается одно внешнее воздействие – случайная функция напряжения на токоприёмнике

U , необходимо определить несколько величин – токов, которые являются также случайными функциями. Следовательно, надо определить статистические характеристики этих величин (законы распределения, функции математического ожидания и дисперсии).

МЕТОД ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Определение законов распределения случайного процесса на выходе нелинейной динамической системы оказывается очень сложной и трудоемкой, математической задачей [1,4]. Точное аналитическое решение этой задачи возможно получить лишь для некоторых конкретных простейших нелинейных систем при известных видах внешнего случайного действия и характеристиках нелинейных элементов системы. Поэтому практическое решение поставленной задачи возможно только приближенными методами. Кроме этого, во многих практических задачах моментные функции (и прежде всего, функции математического ожидания $m(t)$, корреляционная функция $K(t, t')$ и функция дисперсии $D(t)$) дают достаточно полное представление о случайном процессе на выходе системы. И, одновременно, в теории линейных систем существуют простые преобразования моментных функций [1]: если случайная функция $X(t)$ с математическим ожиданием $m_x(t)$ и корреляционной функцией $K_x(t, t')$ преобразуется линейным оператором Z в случайную функцию $Y(t) = Z[X(t)]$, то для нахождения математического ожидания $m_y(t)$ случайной функции $Y(t)$ необходимо применить тот же оператор Z к математическому ожиданию случайной функции $X(t)$ (то есть, $m_y(t) = Z[m_x(t)]$), а для нахождения корреляционной функции $K_y(t, t')$ надо дважды применить тот же оператор к корреляционной функции $K_x(t, t')$, то есть, $K_y(t, t') = Z^{(t)}Z^{(t')}[K_x(t, t')]$.

Изложенный метод дает общий путь решения поставленной задачи: статистически линеаризовав заданную нелинейную систему и применяя правила преобразования моментных функций линейных систем, определяем моментные функции случайных процессов – токов на выходе нелинейной системы (электровоза).

В общем случае система дифференциальных уравнений, которая описывает переходные процессы в силовых цепях ЭПС постоянного тока, может быть сведена к дифференциальному уравнению первого порядка с постоянными коэффициентами в нормальной форме (в форме Коши):

$$\frac{dI_k(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{ki} \cdot I_i(t) + b_k \cdot U(t) + \sum_{q=1}^s d_{kq} \cdot E_q(t), \quad (1)$$

где

$$E_q(t) = F_q[\Phi_q(t)], \quad (q = 1, 2, \dots, s), \quad (2)$$

а

$$\Phi_q(t) = A_q \cdot I_r(t) + B_q \cdot U(t), \quad (3)$$

где $a_{ki}, b_k, d_{kq}, A_q, B_q$ – постоянные коэффициенты (в общем случае они могут зависеть от времени); n – порядок системы дифференциальных уравнений; s – число нелинейных статических элементов; $I_i(t), I_r(t), I_k(t)$ – случайные процессы на выходе в системы; $U(t)$ – внешнее случайное воздействие на систему (напряжение на токоприемнике); $\Phi_q(t)$ – случайное воздействие на входе нелинейного элемента; $E_q(t)$ – случайное действие на выходе q -го нелинейного элемента; $F_q[\Phi_q(t)]$ – характеристика q -го нелинейного элемента.

Выполним линеаризацию характеристик нелинейных элементов, используя для этого метод статистической линеаризации [3]. Тогда характеристику q -го нелинейного элемента можно записать в виде:

$$E_q = F_q[\Phi_q(t)] \approx K_{q0}(t) \cdot m_{\Phi_q}(t) + K_{q1}(t) \cdot \Phi_q^0(t), \quad (q = 1, 2, \dots, s), \quad (4)$$

где $m_{\Phi_q}(t)$ – математическое ожидание случайной функции воздействия; $\Phi_q(t)$ – на входе q -го нелинейного элемента; $\Phi_q^0(t) = \Phi_q(t) - m_{\Phi_q}(t)$ – центрированная случайная функция воздействия $\Phi_q(t)$; $K_{q0}(t), K_{q1}(t)$ – коэффициенты статистической линеаризации характеристики $F_q[\Phi_q(t)]$ нелинейного элемента. Эти коэффициенты в общем случае могут быть функциями времени:

$$K_{q0}(t) = f_0[m_{\Phi_q}(t), \sigma_{\Phi_q}(t); t], \quad (5)$$

$$K_{q1}(t) = f_1[m_{\Phi_q}(t), \sigma_{\Phi_q}(t); t]. \quad (6)$$

Очевидно, что математическое ожидание $M[E_q(t)] = M[F_q\{\Phi_q(t); t\}] = K_{q0}(t) \cdot m_{\Phi_q}(t)$. (7) так как математическое ожидание центрированной случайной функции $\Phi_q^0(t)$ равно нулю.

Применяя к левой и правой частям уравнений (1) и (3) операцию математического ожидания и учитывая (7), получим, что

$$\frac{dm_{Ik}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{ki} \cdot m_{Ii}(t) + b_k \cdot m_U(t) + \sum_{q=1}^s d_{kq} \cdot K_{q0} \cdot m_{\Phi_q}(t), \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (8)$$

$$m_{\Phi_q}(t) = A_q \cdot m_{I_k}(t) + B_q \cdot m_U(t), \quad (q = 1, 2, \dots, s). \quad (9)$$

В выражении (8), в соответствии с (5), коэффициенты K_{q0} зависят не только от математических ожиданий $m_{\Phi_q}(t)$, но и от неизвестных среднеквадратических отклонений $\sigma_{\Phi_q}(t)$ случайных действий $\Phi_q(t)$. Поэтому для определения этих $\sigma_{\Phi_q}(t)$, а также среднеквадратических отклонений $\sigma_{Ik}(t)$ искомым случайным процессом в системе рассмотрим

уравнения, полученные путем отнимания уравнений (8) и (9) из соответствующих уравнений (1) и (3). Тогда с учетом (4) получим

$$\frac{dI_k(t)}{dt} - \frac{dm_{lk}(t)}{dt} = \left(\frac{dI_k(t)}{dt} \right)^0 = \sum_{i=1}^n a_{ki} \cdot I_i^0(t) + b_k \cdot U^0(t) + \sum_{q=1}^s d_{kq} \cdot K_{q0} \cdot \Phi_q^0(t), \quad (k=1,2,\dots,n), \quad (10)$$

$$\Phi_q^0(t) = A_q \cdot I_k^0(t) + B_q \cdot U^0(t), \quad (q=1,2,\dots,s), \quad (11)$$

где $I_k^0(t)$, $U^0(t)$, $\Phi_q^0(t)$ – центрированные случайные функции.

Полученная система уравнений (10) – (11) является линейной. И потому решив ее вместе с уравнениями (8) – (9), (5) – (6) методами анализа линейных систем [4,3], определим искомые математические ожидания $m_{lk}(t)$ и среднеквадратические отклонения $\sigma_{lk}(t)$ случайных процессов $I_k(t)$ в системе.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОВОЗА В РЕЖИМЕ ТЯГИ

Для расчёта стохастических процессов в одном из аварийных режимов первого украинского электровоза ДЭ1 используем предложенный метод.

Резкое изменение напряжения на токоприёмнике, при эксплуатации ЭПС, является наиболее распространенным аварийным режимом. Практика показывает, что при переходном режиме в условиях частых и резких изменений напряжения ухудшаются коммутационные и потенциальные условия на коллекторе тягового двигателя, в результате чего на нем может возникнуть круговой огонь. Этому режиму способствует отключение других электровозов, работающих на линии, коммутация в системе электроснабжения, короткие замыкания в контактной сети, отрыв – касание токоприёмника, гололёд. При этом под режимом резкого изменения напряжения следует различать такие два режима, как полное снятие питающего напряжения, то есть, снижение его до нуля на некоторое время $t_{сн}$ с последующим восстановлением, так и режим повышения (или понижения) толчком питающего напряжения от одного его значения к другому. В статье предложен на рассмотрение первый режим параллельного соединения двух тяговых двигателей электровоза.

В исследуемом режиме снятия питающего напряжения с последующим его восстановлением следует различать стадии: а) при наличии дуги между токоприёмником и контактной сетью (вначале снятия), б) при полном отключении ЭПС (пантографа от контактной сети), то есть, с момента достижения тока нуля, в) при восстановлении напряжения.

Математическая модель электровоза на каждой стадии различна. Для первой стадии снятия напряжения характерно горение дуги, согласно рис. 3, модель на пару главных полюсов будет иметь вид:

$$i_{я} = i_{в} + i_{ш}, \quad (12)$$

$$2R_{дг} \cdot i_{я} + 2R_{в} \cdot i_{в} + 2 \cdot 2p \cdot \sigma_{в} \cdot w_{в} \cdot \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{я} \cdot i_{я} + 2L_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + 2e(t) = U, \quad (13)$$

$$2R_{в} \cdot i_{в} + 2 \cdot 2p \cdot \sigma_{в} \cdot w_{в} \cdot \frac{d\Phi}{dt} - R_{ш} \cdot i_{ш} - L_{ш} \cdot \frac{di_{ш}}{dt} = 0, \quad (14)$$

$$2\sigma_{вх} \cdot w_{вх} \cdot \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{вх}(t) \cdot i_{вх} = 0, \quad (15)$$

$$w_{в} \cdot i_{в} + w_{вх} \cdot i_{вх} = w_{в} \cdot i_{\mu}$$

или, при условии, что $w_{в} = w_{вх}$,

$$i_{в} + i_{вх} = i_{\mu}, \quad (16)$$

где и на рис. 3 $i_{я}$, $i_{в}$, $i_{ш}$, $i_{вх}$ – токи соответственно в обмотке якоря, обмотке возбуждения, шунтирующем контуре, вихревой; p – число пар полюсов обмотки главных полюсов двигателя; $\sigma_{в}$, $\sigma_{вх}$ и $w_{в}$, $w_{вх}$ – коэффициенты рассеяния и число витков соответственно обмотки возбуждения (главных полюсов) и контура вихревых токов; i_{μ} – ток намагничивания станины, который является нелинейной функцией Φ :

$$i_{\mu} = 33,601 - 2536,387\Phi(t) + 2,518 \cdot 10^5 \cdot \Phi^2(t) - 4,031 \cdot 10^6 \cdot \Phi^3(t) + 2,269 \cdot 10^7 \cdot \Phi^4(t); \quad (17)$$

Φ , $\Phi_{св}$, $\Phi_{свх}$ – магнитные потоки соответственно основной (станины), рассеивания в обмотке возбуждения, вихревом контуре; $R_{дг}$ – сопротивление дуги.

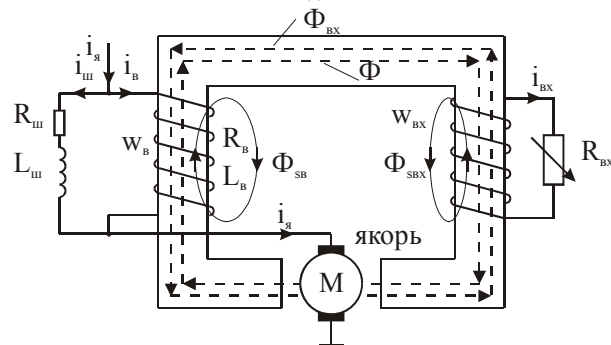


Рис. 3. Электромагнитная схема замещения тягового двигателя

Влияние дуги следовало бы учитывать путём использования её вольт–амперной характеристики. Но, согласно практическим данным [5], падение напряжения в дуге для высоковольтных цепей (в том числе и ЭПС) составляет 2–3 % питающего напряжения, то есть, $R_{дг}$ является «малым параметром» [2] и поэтому дуга может быть учтена как линейный резистор $R_{дг}$.

Учёт вихревого тока, возникающий в станине и в сердечнике главных полюсов тяговых двигателей, как следует из рис. 3, осуществляется эквивалентным короткозамкнутым контуром с числом витков $w_{вх}$ и индуктивно (через Φ) связанным с обмоткой главных полюсов аналогично обмоткам однофазного трансформатора. Активное сопротивление $R_{вх}$ этого контура является переменной величиной, зависящей от

времени развития переходного процесса вследствие постепенного проникновения вихревых ЭДС и токов от периферийных частей магнитопровода его вглубь.

Для второй стадии снятия напряжения, т. е. после разрыва дуги: ток якоря $i_{я}$ достигает нуля ($i_{я} = 0$), сопротивление дуги $R_{дг} \rightarrow \infty$ и $U = 0$. Следовательно, математическая модель содержит систему (14) – (16) и уравнение $i_{в} + i_{ш} = 0$.

Стадия восстановления напряжения описывается системой уравнений (12) – (16), но при условии, что $R_{дг} = 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ

На основании изложенной методики и приведённых выше статистических данных распределения напряжения (рис. 1) были выполнены численные расчёты основных переходных величин для следующих данных тягового двигателя электровоза ДЕ1:

$$R_{дг} = 0,22 \text{ Ом}; R_{я} = 0,051 \text{ Ом}; L_{я} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$R_{ш} = 0,005 \text{ Ом}; L_{ш} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \sigma_{вх} = \sigma_{в} = 1,25;$$

$$C_w = 156,69; \omega = 170,044 \text{ с}^{-1};$$

$$w_{в} = w_{вх} = 16 \text{ витков}; I_{ном} = 565 \text{ А}.$$

Сопротивления вихревого контура при снятии и восстановлении напряжения соответственно равны:

$$R_{вх}^{сн}(t) = \frac{2,78 \cdot 10^{-3}}{2,55 \sqrt{1 - e^{-1,5 \frac{t}{11,402}}}}; R_{вх}^{вс}(t) = \frac{2,78 \cdot 10^{-3}}{2,55 \left(1 - e^{1,6 \cdot 10^{-3} t}\right)}$$

Ввиду того, что переходные процессы в тяговом двигателе, а значит и во всём электровозе, определяются процессами в магнитопроводе тягового двигателя, прежде всего, в переходных режимах определяли характер изменения магнитного потока $\Phi(t)$.

Результаты численных расчётов переходных процессов на параллельном соединении ОП 3 представлены на рис. 4 – 7 и в табл. 2

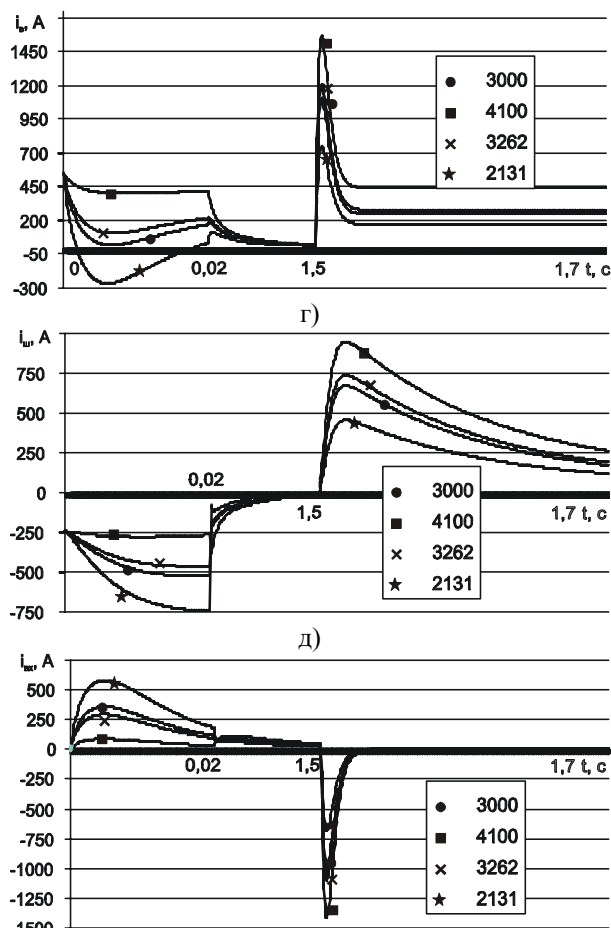
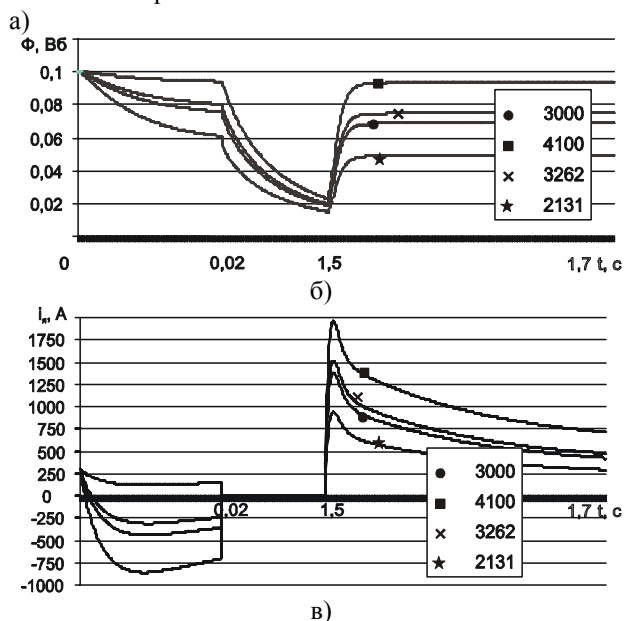


Рис. 4. Временные зависимости изменения переходных магнитного потока Φ (а), тока якоря $i_{я}$ (б), тока обмотки возбуждения $i_{в}$ (в), тока шунтирующей цепи $i_{ш}$ (г) и вихревых токов $i_{вх}$ (д) при времени снятия напряжения $t_{сн} = 0,5 \text{ с}$ и разных напряжениях на токоприёмнике. Периоды процесса: 0–0,02 с – процесс снятия напряжения с дугой, $i_{я} \neq 0$; 0,02–1,5 с – процесс снятия при $i_{я} = 0$; 1,5–1,7 с – восстановление напряжения

В качестве примера, на рис. 4, показаны временные зависимости изменения основных величин – магнитного потока $\Phi(t)$, токов якоря $i_{я}$, обмотки возбуждения $i_{в}$, шунта $i_{ш}$ и $i_{вх}$ – для всех трёх стадий переходных процессов: горения дуги, полного разрыва цепи тягового двигателя ($i_{я} = 0$) и восстановления питающего напряжения.

Проанализировав результаты численных расчётов, приходим к следующим выводам:

1. Как в режиме горения дуги, так и при полном снятии напряжения ($i_{я} = 0$) скорость затухания магнитного потока выше, а его конечное значение заметно ниже при меньшей величине исходного напряжения на токоприёмнике (рис. 4,а). Это обусловлено тем, что при большем U величина Φ и его $\frac{d\Phi}{dt}$ большие, а значит больше и вихревые токи ($i_{вх} = \gamma \cdot \Phi \cdot \frac{d\Phi}{dt}$) и выше их тормозящее действие.

В начальный период снятия напряжения, дли-

тельностью 0,02 С, то есть, во время горения дуги, поток уменьшается экспоненциально и одновременно наблюдается резкое повышение всех токов. При наиболее высоком напряжении $U = 4100$ В и наиболее низком $U = 2131$ В при степени ослабления поля ОП 4 (т.е. $\beta = 0,43$) за время примерно 0,011–0,012 с токи $i_{я}, i_{в}, i_{ш}$ меняют своё направления и возрастают до $(0,21...1,5) \cdot I_{ном}$, $(0,7...0,47) \cdot I_{ном}$ и $(0,49...1,3) \cdot I_{ном}$ соответственно. Длительность действия размагничивающего импульса тока $i_{в}(t)$ составляет (0,02–0,023) С. Бросок вихревых токов достигает $(0,15...1,03) \cdot I_{ном}$.

2. После полного разрыва цепи ($i_{я} = 0$), то есть, при $t > 0,02 - 1,5$ с, скорость затухания магнитного потока резко возрастает и для режимов с исходным $U = 4100$ В и $U = 2131$ В за время снятия $t_{сн}$, равное 1,5 с, величина Φ уменьшается, примерно 45,5 % и соответственно 40,2 % от его установившегося значения. При этом в режиме полного поля характер затухания магнитного потока (и изменения других переходных величин) определяется только вихревыми токами, зависящими от сопротивления $R_{вх}^{сн}$ контура вихревых токов.

3. В режиме ослабления поля при $i_{я} = 0$ на характер и степень затухания $\Phi(t)$, а также на изменения токов, оказывают не только вихревые токи, но и ток $i_{ш}$ шунтирующего контура. Магнитодвижущая сила, создаваемая контуром, частично идёт на поддержание магнитного потока двигателя (что видно из характера изменения токов $i_{в}(t)$ и $i_{ш}(t)$, рис. 4, в и г), а частично на создание потокосцепления индуктивного шунта. При этом токи обмотки возбуждения и шунта снижаются практически до нуля через примерно 1,5 С после снятия напряжения.

4. В режиме восстановления питающего напряжения, в его первые моменты времени, как известно, и как следует из рис. 4, б, наблюдается резкое возрастание (бросок) тока якоря $i_{я}$. А как следует из результатов расчётов, броски имеют место и у тока возбуждения $i_{в}$, и тока шунта $i_{ш}$, и вихревых токов $i_{вх}$ (рис. 4, в, г, д). Причина появления броска тока якоря (а вместе с ним и других токов) заключается в том, что вместе с появлением тока двигателя начинает повышаться и основной магнитный поток, а, следовательно, и противо-ЭДС якоря. Однако это повышение замедленное (рис. 4, а) и поэтому в первые моменты восстановления ток якоря ограничивается только очень малым активным сопротивлением двигателя при достаточно большом появившемся вновь напряжении на токоприёмнике.

5. Как следует из рис. 4, с повышением напряжения амплитуды бросков токов возрастают, причём, чем больше напряжение, тем быстрее происходит нарастание токов. Однако относительное изменение величины амплитуды бросков токов больше, чем относительное изменение величины напряжения. При

$U = U_{ном} = 3000$ В и $t_{сн} \leq 1,5$ с броски тока якоря $I_{я\max}$ превышают номинального значения в 2,45 раза (рис. 4, б) и, следовательно, восстановление питания в этом случае создаёт опасности для двигателей и электровоза в целом.

При заданных неизменных параметрах электрической цепи двигателя и шунтирующей цепи были произведены численные расчёты при различных: 1) степенях ослабления поля $\beta = 0,43; 0,57; 0,65$ и $0,78$; 2) значениях времени снятия напряжения $t_{сн} = 0,5; 1,5$ и $3,0$ с; 3) значениях восстановления напряжения U , как случайной функции (рис. 1–2). Величины бросков токов зависят от значения восстановленного напряжения U , степени ослабления поля β и времени снятия напряжения $t_{сн}$.

В начальные моменты времени, при $t_{сн} \leq 0,1 - 0,15$ с сопротивление $R_{вх}^{сн}$ большое, тем самым $i_{вх}$ и создаваемый им магнитный поток $\Phi_{вх}$ (Рис. 4, а) невелики, противодействие снижению магнитного потока Φ мало и поэтому последний затухает резко. В последующие моменты, при $t_{сн} \leq 0,1 - 0,15$ с точнее на интервале $t_{сн} \leq 0,1 - 0,15$ с, величина $R_{вх}^{сн}$ на 65 % меньше, чем в начальной стадии. Это обуславливает большую величину $\Phi_{вх}$ и тем самым большее противодействие затуханию основного потока $\Phi(t)$, вследствие чего скорость уменьшения последнего снижается.

С увеличением показателя ослабления поля β и времени снятия напряжения $t_{сн}$ математическое ожидание $m_{I_{я\max}}$ (рис. 5) и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{I_{я\max}}$ (табл. 2) амплитуды броска тока якоря заметно возрастают. Наибольшее абсолютное значение амплитуды броска тока $I_{я\max}$ наблюдается при $U_{\max} = 4100$ В, $\beta = 0,78$ и $t_{сн} = 3,0$ с; оно равно $4I_{ном}$. Согласно гистограмме Рис. 6, область вероятных значений бросков тока якоря заключена в интервале 63,3–2258,6 А, то есть, $(0,112...4,0) \cdot I_{ном}$, а наиболее вероятными значениями являются значения 377...1631 А.

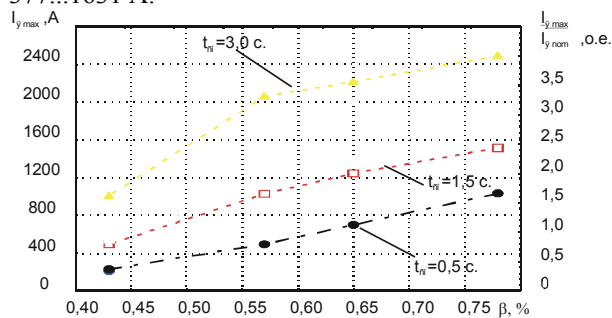


Рис. 5. Значения математического ожидания амплитуды броска тока якоря в зависимости от степени ослабления поля β и времени снятия напряжения $t_{сн}$

Таблица 2

Значения среднеквадратического отклонения величины амплитуды броска тока якоря $\sigma_{I_{я\max}}$ (в амперах) в зависимости от степени ослабления поля β и времени $t_{сн}$ снятия напряжения

Степень ослабления поля, β	Время снятия напряжения, с		
	0,5	1,5	3
0,78	114,8	169,8	183,7
0,65	83,0	144,5	170,0
0,57	66,2	124,2	62,5
0,43	16,8	27,7	35,0

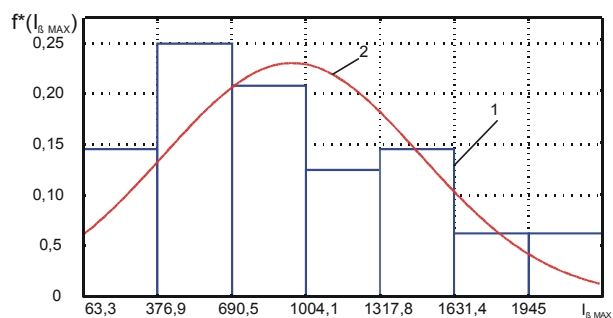


Рис. 6. Гистограмма (1) и теоретическое распределение по Гауссу (2) максимального значения тока якоря при времени снятия напряжения $t_{сн} = 0,5; 1,5; 3,0$ с и случайных напряжениях на токоприёмнике U в момент восстановления напряжения

Аналогично, анализ данных статистического закона распределения рис. 7 свидетельствует, что броски тока в обмотке возбуждения составляют от 107,2 до 1782,3 А, то есть, $(0,2...3,15) \cdot I_{НОМ}$, а наиболее вероятными значениями являются 347...1304 А.

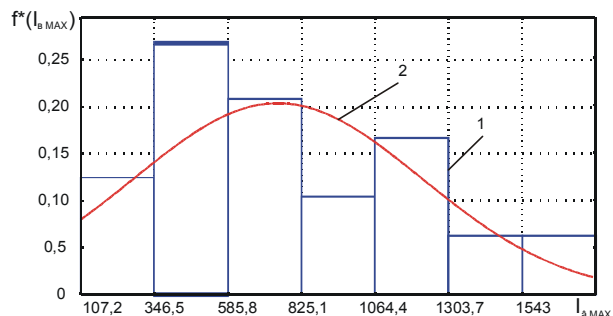


Рис. 7. Гистограмма (1) и теоретическое распределение по Гауссу (2) максимального значения тока обмотки возбуждения при времени снятия напряжения $t_{сн} = 0,5; 1,5; 3,0$ с и случайных напряжениях на токоприёмнике U в момент восстановления напряжения

Броски тока в шунтирующем контуре 1,5...2,0 раза меньше, чем в обмотке возбуждения.

Возникающие перенапряжения на обмотках якоря и обмотке возбуждения, достигающие соответственно 1000 и 3100 В.

ВЫВОД

Даже при $U = U_{НОМ} = 3000$ В в режиме ОП 4 и времени снятия напряжения менее 1,5 с броски тока якоря уже превышают номинальное значение и, следовательно, восстановление напряжения в этих режимах создаёт опасность для двигателя и электровоза в целом. В наиболее неблагоприятных условиях режима восстановления максимальное значение тока якоря достигают $4I_{НОМ}$, обмотки возбуждения – $3,1-3,2I_{НОМ}$, а броски тока в шунтирующем контуре в 1,5...2 раза меньше, чем в обмотке возбуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576с.
- [2] Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- [3] Казаков Н.Е., Доступов Б.Г. Статистическая динамика нелинейных автоматических систем. – Москва: Гос. изд. физ.-мат. лит.-ры, 1962.–331с.
- [4] Лившиц Н.А., Пугачёв В.Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления. – М.: Советское радио, 1963. – Т.1 –482с.; Т.2 – 895с.
- [5] Лозановский А.Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования: Автореф. дис...канд.наук / Всесоюзный научно-исслед. ин-т. – М., 1963 – 20с.

Поступила 18.05.2005