

## ТЕЛЕГРАФНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ЗАТУХАЮЩЕГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

О.И. Хомутов, А.А. Грибанов, И.Б. Губин

В настоящее время в условиях устойчивого экономического роста возрастает актуальность вопросов, связанных с повышением эффективности использования технологического оборудования. Для привода различных машин и механизмов на большинстве предприятий используются электродвигатели (ЭД), из которых благодаря ряду показателей наиболее часто применяются асинхронные двигатели (АД). Надёжность их работы остаётся недостаточно высокой, в связи с чем имеют место преждевременные выходы их из строя, приводящие к наличию значительных ущербов. Наиболее часто отказы АД наблюдаются вследствие повреждения изоляции обмоток. Поэтому проведение комплекса мероприятий, направленных на обеспечение работоспособности электроизоляционной системы, является одним из основных условий безотказной работы АД.

Изоляция электродвигателей представляет собой многокомпонентную электроизоляционную систему [1 - 6]. В процессе эксплуатации ЭД на изоляцию действует широкий комплекс дестабилизирующих факторов, приводящих к изменению ее состояния [7 - 10]. Открытость системы и неоднородность ее состава обуславливает сложные связи между ее внешними и внутренними факторами. Данная система многокомпонентна не только по своим составляющим (межвитковая, межфазная, корпусная изоляция), но и по совокупности используемых материалов для ее производства (сочетание полимерных пленок, эмалевой изоляции обмоточных проводов и пропитка этой композиции лаком, компаундом) [1, 4, 6]. Материалы диэлектриков, используемые для изготовления современных изоляционных конструкций, характеризуются значительной неоднородностью структуры и различием электрофизических свойств в объеме материала. Как следствие, из этого возникают трудности при оценке и прогнозировании состояния изоляции ЭД.

Техническое состояние изоляции АД можно оценить с помощью интегральных диагностических параметров [10 - 13]. В общем случае они должны объективно описывать

состояние межвитковой и корпусной изоляции АД. Для целей прогнозирования предпочтительно иметь один обобщенный диагностический параметр, характеризующий состояние всей изоляционной системы, а не группу параметров. Использование группы диагностических параметров дает более объективную картину состояния изоляции, но усложняет процедуру прогнозирования, приводит к громоздкости и неудобному практическому использованию разрабатываемых математических моделей и методов [13].

В настоящее время актуальной становится проблема использования для целей оценки технического состояния изоляции ЭД параметров, определяемых на основе современных методов диагностирования. В частности, использование метода диагностирования изоляции обмоток ЭД на основе параметров переходного процесса, возникающего при тестировании обмотки импульсом напряжения, является эффективным методом неразрушающих испытаний [10 - 12].

Общая схема диагностики обмотки статора ЭД импульсами напряжения представлена на рисунке 1.

Схема тестирования обмотки статора электрической машины с использованием генератора импульсов и осциллографа представлена на рисунке 2

Данные параметры можно интерпретировать как отклик (реакцию) системы на тестовое возмущение, по которому оценивают ее состояние в целом. Данные диагностические параметры изоляции обмоток ЭД являются интегральными параметрами, характеризующими все составляющие элементы ее электрической модели.

Параметром, который наиболее полно описывает переходный процесс и позволяет оценить состояние изоляции обмоток электрических машин, является модифицированный обобщенный диагностический параметр (МОДП)  $F$ , определяемый при тестировании изоляции обмотки статора импульсом напряжения [13]. Он представляет собой отношение декремента затухания к периоду затухания переходного процесса и показывает, с

одной стороны, изменение амплитуды за один период, а с другой - скорость затухания колебаний во времени:

$$F = \frac{d}{T}, \quad (1)$$

где  $d = \ln(U_1/U_2)$  - декремент затухания;

$U_1, U_2$  - амплитуды затухающих колебаний соответственно первого и второго положительных полупериодов;

$T$  - период затуханий.

Общая схема диагностики статора электродвигателей импульсами напряжения

ГТС – генератор тестовых сигналов;

РУ – регистрирующее устройство

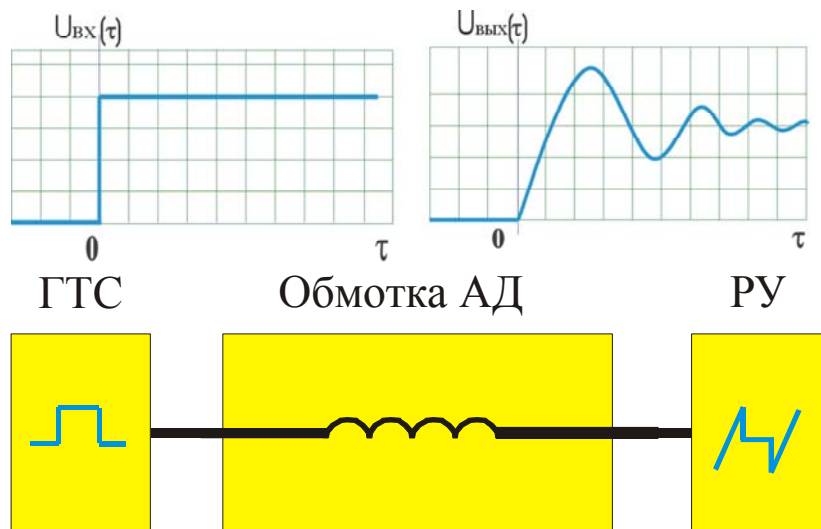


Рис.1.

Схема тестирования обмотки статора электрической машины с использованием генератора импульсов и осциллографа

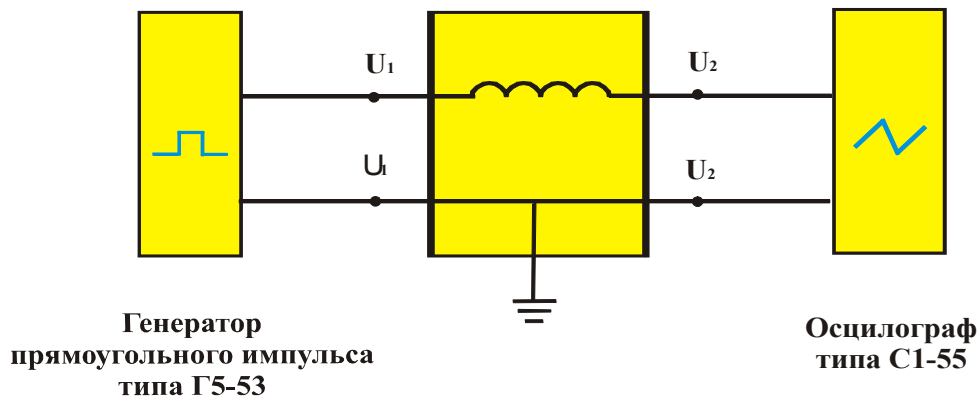


Рис. 2

## ТЕЛЕГРАФНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ЗАТУХАЮЩЕГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Этот параметр  $F$  формально представляет собой произведение декремента затухания и частоты затухающих колебаний. Он характеризует одновременно и изменение амплитуд свободных колебаний в логарифмическом масштабе, и скорость данного процесса во времени.

Данный параметр является интегральной характеристикой состояния межвитковой и корпусной изоляции обмоток статора,

Диагностический параметр  $F$  определяется функцией  $U = U(t)$  - распределением мгновенных значений напряжения на конце обмотки при подаче на ее начало тестового сигнала  $F = f(U(t))$ . Значения данной функции зависят от параметров схемы замещения обмотки, а значит и от состояния изоляции обмотки ЭД  $U(t) = f(R, L, C, K, G)$ , где  $R, L, C, K, G$  - параметры схемы замещения обмотки электродвигателя.

Следовательно, диагностический параметр  $F$  определяется параметрами схемы замещения обмотки и состоянием изоляции обмотки ЭД  $F = f(R, L, C, K, G)$ .

При математическом моделировании обмотки электрических машин можно представить в виде электрических цепей с распределенными параметрами (ЦРП) [14, 15].

При тестировании обмотки электрических машин импульсами напряжения процессы распространения возмущений электромагнитного поля носят характер бегущих волн, т.е. имеют место волновые процессы.

Обмотки, представленные в виде ЦРП, обладают рядом особенностей [14]:

- 1) цепь можно считать линейной;
- 2) параметры схемы замещения существенно зависят от скорости изменения напряжения (тока) на фронте бегущей волны, т.е. от крутизны фронта или от эквивалентной частоты, которая определяется по формуле:

$$f_{эке} \approx 1/2t_{фр}. \quad (2)$$

где  $t_{фр}$  - длительность фронта волны;

3) процессы в стали статора и ротора существенно влияют на волновые явления;

4) в схемах замещения фазных обмоток должна учитываться продольная емкость между смежными витками одной секции;

5) в трехфазных обмотках допустимо рассмотрение каждой фазы в отдельности ввиду незначительности индуктивных и емкостных связей между ними.

По показателям волновых процессов, возникающих при тестировании обмоток импульсами напряжения, можно оценить техни-

ческое состояние изоляции, т.е. состояние межвитковой и корпусной изоляции обмоток электрических машин [12, 13].

Электрическую машину при волновых процессах можно считать сложной системой, состоящей из ряда волноводов [14].

К числу данных волноводов относятся:

1) основной продольный волновод, образованный стенками паза и проводниками обмотки;

2) вспомогательные поперечные волноводы — вентиляционные каналы статора и ротора, а также изоляционные зазоры между стальными листами сердечников.

Пазовые части обмотки влияют на волновые явления значительно сильнее, нежели лобовые.

Электромагнитная волна, распространяясь вдоль обмотки, одновременно проникает как в проводники, так и в листы сердечника на так называемую эквивалентную глубину.

Вводя эквивалентную частоту, получаем, что эквивалентная глубина проникновения плоской электромагнитной волны в проводящие среды равна:

- для проводников обмотки

$$\delta_a \approx \sqrt{\frac{2t_{фр}}{\pi\mu_0\sigma_m}}; \quad \delta_{0,05} = 1,5\delta_a \quad ;(3)$$

- для листов стали в слабых магнитных полях

$$\delta_a \approx \sqrt{\frac{2t_{фр}}{\pi\mu_0\mu_{rв}\sigma_{см}}}; \quad \delta_{0,05} = 1,6\delta_a \quad ; (4)$$

- то же в сильных магнитных полях

$$\delta'_a \approx \sqrt{\frac{2t_{фр}}{\pi\mu_0\mu_{rв}\sigma_{см}}}; \quad \delta'_{0,05} = 1,4\delta'_a \quad , (5)$$

где  $\sigma_m, \sigma_{см}$  - удельные проводимости медных проводников и стальных листов соответственно;

$\mu_{rв}$  - относительная магнитная проницаемость на внешней поверхности листа стали.

Внешнее электромагнитное поле затухает на глубине  $\delta_a$  в  $e = 2,72$  раз, на глубине  $\delta_{0,05}$  до 5 % от своего значения на поверхности проводящей среды.

Если соблюдается условие

$$d \geq \delta_{0,05} \text{ или } d' \geq \delta'_{0,05}, \quad (6)$$

где  $d$  или  $d'$  - наименьший поперечный линейный размер сечения проводящей среды, то ее можно считать «массивным телом».

В этом случае явления поверхностного эффекта можно рассматривать, считая волну плоской.

Граница слабых и сильных магнитных полей, соответствующая максимуму кривой  $\mu_r(H)$  для сталей марки 1511—1512, лежит в пределах 55-110 А/м.

Магнитную систему электрических машин при волновых процессах можно считать линейной из-за малого значения  $\mu_r$ . Однако там, где это целесообразно, вводятся небольшие поправки, например, в виде различия  $\delta_a$  и  $\delta_{0,05}$  при слабых и сильных полях.

Токи смещения в изоляции формируются примерно на два порядка быстрее, чем вихревые токи в проводниках обмотки и в листах сердечника. Поэтому при подходе волны с крутым фронтом к обмотке машины, содержащей несколько витков в секции, в ней «мгновенно» возникает так называемое первоначальное распределение напряжения. При этом схема замещения обмотки на доли микросекунды вырождается в чисто емкостную цепь. Это явление учитывается при математической постановке задачи.

При быстром нарастании напряженности электрического поля на фронте бегущей электромагнитной волны в изоляции машины возникают заметные диэлектрические потери. Мощность потерь в изоляции

$$P_{из} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta E_{паз}^2 V_{из}, \quad (7)$$

где  $\omega$  - эквивалентная угловая частота;

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная;

$\varepsilon_r$  - усредненная относительная диэлектрическая проницаемость пазовой изоляции;

$\delta$  - угол диэлектрических потерь в изоляции;

$E_{паз}$  - усредненное значение напряженности электрического поля в пазовой изоляции, объем которой равен  $V_{из}$ .

Наличие воздушного зазора между статором и ротором в заметной степени приближает «магнитные» параметры обмотки к линейным. Для учета шихтовки пакетов стали сердечника машины вводится особый расчетный коэффициент  $\mu_{ш}$ .

Подмагничивание стали рабочим током 50 Гц, на который накладываются волновые токи, вызванные, например, пробоем изоляции, может быть учтено введением комплексной магнитной проводимости. В целом подмагничивание рабочим током 50 Гц примерно на 15—20 % снижает волновое сопротивление и коэффициент ослабления обмотки, увеличивая скорость распространения волны, амплитуду и частоту собственных колебаний.

Относительная магнитная проницаемость электротехнической стали при волновых процессах незначительна и близка к ее начальному значению. Для эквивалентных частот 50 кГц и выше  $\mu_r = 180 \div 250$ , при более низких частотах  $\mu_r = 1500 \div 2000$ .

Электромагнитное поле проникает в листы стали как со стороны их торцов, так и с боковых сторон. Глубина этого проникновения определяется по (3) – (5).

При волновых процессах потери на гистерезис в листах стали составляют 3-4 % от потерь на вихревые токи и могут не учитываться при расчетах волновых процессов.

Как уже упоминалось выше, для расчетов волновых процессов используются схемы замещения. Эти схемы замещения имеют следующие параметры:

— индуктивность катушки  $L, L'$ ;

— активное сопротивление катушки  $r, R$ , равное сумме эквивалентного сопротивления потерям в стали на вихревые токи и активного сопротивления проводов обмотки с учетом поверхностного эффекта;

— продольная емкость катушки  $K$ , т.е. частичная емкость между ее первым и последним витками вдоль обмотки;

— поперечная емкость катушки  $C$ , т.е. частичная емкость ее проводников относительно корпуса (земли);

— активная проводимость  $G$ , эквивалентная диэлектрическим потерям в корпусной изоляции.

Все эти параметры следует считать усредненными по длине

обмотки, т.е.

$$L = L_\phi / N; \quad r = r_\phi / N; \quad K = K_\phi / N; \\ C = C_\phi / N; \quad G = G_\phi / N, \quad (8)$$

где нижний индекс «ф» поставлен у параметров всей фазной обмотки.

Для одного и того же двигателя параметры схем замещения имеют следующую связь:

$$L' = L + \frac{R^2}{\omega^2 L}; \quad (9)$$

$$r = R + \frac{(\omega L)^2}{R}, \quad (10)$$

где  $\omega$  - эквивалентная частота, при которой определяются параметры.

ЦРП могут характеризоваться двумя группами параметров — первичными и вторичными.

Для обмоток электрических машин — первичные параметры следующие:  $C, L, R, G, K$ .

## ТЕЛЕГРАФНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ЗАТУХАЮЩЕГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

К вторичным параметрам ЦРП относятся волновое (характеристическое) сопротивление и коэффициент распространения.

Параметры схемы замещения обмотки электрических машин можно классифицировать следующим образом.

Они могут быть разбиты на две расчетные группы на «магнитные» ( $R, L$ ) и «электрические» ( $C, K, G$ ) волновые первичные параметры или продольные ( $R, L, K$ ) и поперечные ( $C, G$ ) параметры схемы замещения.

При вычислении магнитных волновых параметров обмоток — активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$  — в соответствии со схемой замещения обмотки.

Укладка обмоток вразвалку (всыпная) с обмоткой из круглой меди, уложенной в паз случайным образом, так что рядом в обмотке

оказываются несмежные витки. Поэтому в первом случае можно воспользоваться в качестве расчетной модели чертежом пазы, а во втором случае — искусственной эквивалентной моделью, учитывающей статистические закономерности и расположения проводов при их насыпной укладке.

Полагаем известными все конструктивные данные машины, включая ее обмоточную схему.

Схема замещения обмотки ЭД представляет собой однородную электрическую схему замещения с распределенными параметрами на рисунке 3. При подаче на начало обмотки тестового сигнала - импульса напряжения определенной формы и амплитуды в ней возникает переходный (волновой) процесс.

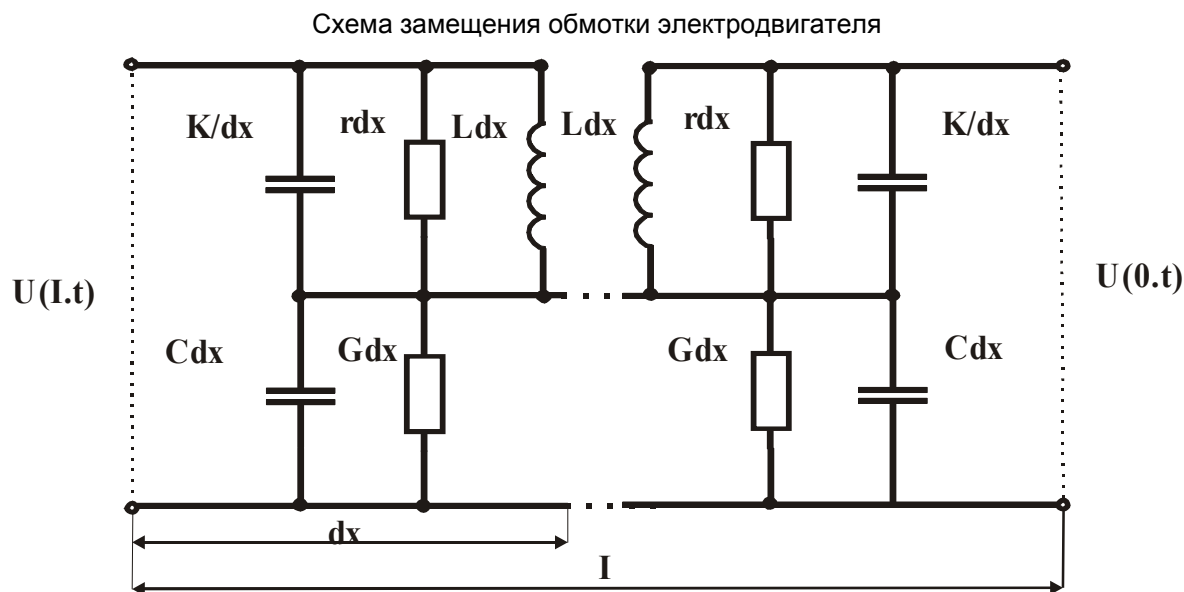


Рис. 3

Волновые процессы в обмотках ЭД можно описать с помощью телеграфного уравнения - дифференциального уравнения в частных производных гиперболического типа четвертого порядка [16]:

$$K \frac{d^4 U(x,t)}{dx^2 dt^2} + g \frac{d^3 U(x,t)}{dx^2 dt} + \Gamma \frac{d^2 U(x,t)}{dx^2} - C \frac{d^2 U(x,t)}{dt^2} - G \frac{dU(x,t)}{dt} = 0, \quad (11)$$

где  $g = 1/r$ ;  $\Gamma = 1/L$ ;  
 $L$  - индуктивность катушки;

$r$  - активное сопротивление катушки, равное сумме эквивалентного сопротивления потерям в стали на вихревые токи и активного сопротивления проводов обмотки с учетом поверхностного эффекта;

$K$  - продольная емкость катушки, т.е. частичная емкость между ее первыми и последними витками вдоль обмотки;

$C$  - поперечная емкость катушки, т.е. частичная емкость ее проводников относительно корпуса (земли);

$G$  - активная проводимость, эквивалентная диэлектрическим потерям в корпусной изоляции;

$U=U(x, t)$  - искомая функция, представляющая собой распределение мгновенных значений напряжения в обмотке при подаче на ее начало тестового сигнала.

Для решения уравнения (11) задаются начальные и граничные условия, обусловленные режимом конца обмотки, параметрами и формой тестового сигнала. В данном случае рассматривается режим изолированного конца фазовой обмотки и реальный импульс напряжения - падающая волна с фронтом нарастания напряжения по экспоненте.

Будем считать напряжение в любой точке обмотки в произвольный момент времени функцией двух независимых переменных - расстояния вдоль обмотки  $x$  и времени  $t$ . Условимся понимать под положительным направлением координаты  $x$ , противоположное движению падающей волны, т.е. от конца к началу. В конце обмотки положим  $x = 0$ , а в начале обмотки  $x = l$ , где  $l$  - длина фазовой обмотки в метрах.

Для рассматриваемого случая имеем следующие начальные условия:

$$K \frac{d^3 U(x, 0)}{dx^2 dt} = C \frac{dU(x, 0)}{dt}. \quad (12)$$

Данное условие связано с распределением напряжения в начальный момент времени, когда схема замещения обмотки вырождается в емкостную цепочку [14, 15].

Условие (13) вытекает из начального условия (12) и граничных условий (15) и (16).

$$\frac{dU(x, 0)}{dt} = \frac{dU(l, 0)}{dt} \cdot \frac{ch(\gamma x)}{ch(\gamma l)}, \quad (13)$$

где  $\gamma^2 = C/K$ .

В начальный момент времени обмотка незаряжена, это обстоятельство и определяет условие (14).

$$U(x, 0) = 0. \quad (14)$$

Граничные условия имеют следующие:

$$\frac{dU(0, t)}{dx} = 0. \quad (15)$$

Граничное условие (15) определяется режимом конца обмотки при тестировании. В данном случае согласно схемы диагностирования конец обмотки изолирован.

$$U(l, t) = U_0(t), \quad (16)$$

где  $U_0(t)$  - одна из двух функций:

- для идеального импульса

$$U_0(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_1 \leq t < t_2 \\ U_m & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3 \\ 0 & \text{при } t_3 < t \leq t_4 \end{cases}, \quad (17)$$

- для реального импульса

$$U_0(t) = \begin{cases} U_m (\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)) & \text{при } t_1 \leq t < t_2 \\ U_m & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3 \\ U_m \cdot (\exp(\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)) & \text{при } t_3 < t \leq t_4 \end{cases}, \quad (18)$$

где  $U_m$  - амплитуда импульса напряжения;

$\alpha, \beta$  - параметры импульса напряжения, зависящие от его формы: фронта и среза сигнала;

$t \in [t_1, t_2]$  - длительность фронта импульса;

$t \in [t_2, t_3]$  - длительность импульса с установившейся амплитудой  $U_m$ ;

$t \in [t_3, t_4]$  - длительность среза импульса;

Граничное условие (16) обусловлено формой тестового сигнала. Так как реальный прямоугольный импульс напряжения, вырабатываемый генератором тестовых сигналов, далек от идеального (17) и характеризуется определенной длительностью фронта и среза импульса, а нарастание и спад напряжения от нуля до установившегося амплитудного значения напряжения  $U_m$  и наоборот во времени близки к экспоненте, то тестовый сигнал с высокой точностью можно аппроксимировать выражением (18).

Формальная постановка математической задачи заключается в том, что требуется найти решение телеграфного уравнения (11) на заданном интервале времени  $t \in [0, T]$ , построить график переходного процесса  $U(0, t)$ , регистрируемого на конце обмотки, и определить параметры данного процесса.

Расчет волновых процессов в обмотках ЭД производится с помощью решения дифференциального уравнения.

Дифференциальные уравнения можно решить различными методами: аналитическими (разделения переменных - методом Фурье) и численными.

Рассмотрим решение дифференциального уравнения (11) для незаряженной обмотки двигателя и схемы замещения по рисунку 3 для изолированного конца фазной обмотки.

При этом полагаем, что на начало незаряженной обмотки подается импульс напряжения с фронтом

$$U_0(t) = U_m \cdot (\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)).$$

Тогда решение дифференциального уравнения  $U(0, t)$  будет представлять собой сумму двух составляющих:

1) конечного распределения напряжения, создаваемого импульсом напряжения;

## ТЕЛЕГРАФНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ЗАТУХАЮЩЕГО ПРОЦЕССА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2) бесконечного ряда свободных колебаний.

$$u(0, t) = U_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t), \quad (19)$$

где  $v_n(t)$  – амплитуда  $n$ -й гармоники, зависящая от параметра  $t$ ;

$v_n = \pi n / 2l$  – обобщённый номер гармоники;

$n = 1, 3, 5, \dots$  – номер гармоники;

$l$  – длина обмотки.

Решив дифференциальное уравнение волнового процесса методом Фурье для выше указанных начальных и граничных условий получим следующее выражение для напряжения на конце обмотки:

$$u(0, t) = U_m (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) + U_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi n} \sin \frac{\pi n}{2} \times \left[ A_n (\delta_n - \alpha) - B_n (\delta_n - \beta) + (\beta - \alpha) \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + v_n^2} \right] \times \frac{\sin \omega_n t}{\omega_n} + (A_n - B_n) \cos \omega_n t \{ e^{\delta_n t} - A_n e^{-\alpha t} + B_n e^{-\beta t} \}, \quad (20)$$

где

$$A_n = \frac{\alpha(C\alpha - G)}{(C + v_n^2 K)\alpha^2 - (G - v_n^2 g)\alpha + v_n^2 \Gamma};$$

$$B_n = \frac{\beta(C\beta - G)}{(C + v_n^2 K)\beta^2 - (G - v_n^2 g)\beta + v_n^2 \Gamma};$$

$$\delta_n = \frac{1}{2} \frac{G + v_n^2 g}{C + v_n^2 K} - \text{коэффициент затухания}$$

$n$ -й гармоники;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{v_n^2 \Gamma}{C + v_n^2 K} - \delta_n^2} - \text{угловая частота}$$

та  $n$ -й гармоники.

Таким образом, в результате проведённых исследований на основе телеграфного уравнения получена математическая модель, позволяющая определять значения параметров переходного процесса в обмотке электрических машин, имеющего вид волновых затухающих колебания, и на их основе оценивать техническое состояние электроизоляционных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоиздат, 1982. - 512 с.: ил.

2. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханова И.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна. - М.: Химия, 1986. - 160 с.

3. Атабеков В.Б. Ремонт трансформаторов, электрических машин и аппаратов: Учебник для сред. ПТУ. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1988. - 416 с.: ил.

4. Барэмбо К.Н., Бернштейн Л.М. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин. - М.: Энергия, 1967.

5. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 376 с.: ил.

6. Бразников А.И., Комаров А.А., Грибанов А.А. Автоматизация работы технологической установки для пропитки и сушки изоляции электродвигателей // Сборник научных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 15.

7. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. - М.: Радио и связь, 1984.

8. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): Учебник для вузов по специальности «Кибернетика электрических сетей». - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш.шк., 1984. - 439 с.

9. Вентцель Е.С. Исследование операций: Задачи, принципы, методология. - 2-е изд., стер. - М.: Наука, 1988. - 208 с.

10. Воронин С.М. Исследование процесса износа изоляции электродвигателей животноводческих объектов и разработка способа прогнозирования ее технического состояния: Дис. ... канд. техн. наук. - Черноград, 1982. - 129 с.

11. Граматович Э.К. Исследование влияния режимов работы электродвигателей животноводческих ферм на срок их службы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Челябинск, 1975. - 31 с.

12. Грибанов А.А. Обоснование точек установки датчиков контрольно-измерительных приборов для эффективного управления технологическим процессом пропитки и сушки изоляции электротехнических изделий // «Электроснабжение и электротехнологии в сельском хозяйстве». Сборник научных трудов «Электроснабжение и электротехнологии в сельском хозяйстве» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002.

13. Грибанов А.А. Учёт влияния температуры при оценке состояния изоляции асинхронных двигателей // Сборник научных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 41 – 43.

14. Грибанов А.А., Губин И.Б. Проблема операционного контроля качества при пропитке и сушке электродвигателей // «Электроснабжение и

электротехнологии в сельском хозяйстве». Сборник научных трудов «Электроснабжение и электротехнологии в сельском хозяйстве» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002.

15. Грибанов А.А., Гутов И.А., Хомутов С.О. Автоматизированная система обеспечения надёжности работы электродвигателей // Сборник науч-

ных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 33 – 40.

16. Гутов И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: Дис ... канд. техн. наук: - Барнаул, 1997. - 259 л.: ил.