
From the Selected Works of Boukhemis Chetate

January, 2005

Paramètres capacitifs et surtensions dans l'enroulement d'un moteur asynchrone, alimenté par un convertisseur MLI

M.T. Belassel
Victor Bepalov
Boukhemis Chetate



Available at: https://works.bepress.com/boukhemis_chetate/8/

Емкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя питаемого от ШИМ-преобразователя

Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я., Шетат Бухемис

Изложена методика расчета емкостных параметров и перенапряжений в обмотке асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты. Представлены математическая модель и результаты моделирования волновых процессов в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором.

Наиболее часто регулируемые электроприводы переменного тока строятся на базе асинхронных двигателей и преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, формирование выходных напряжений которых осуществляют посредством ШИМ, то есть серией импульсов прямоугольной формы.

В большинстве современных ПЧ используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) с частотой переключения $2\div 8$ кГц. Длительность фронта импульсов определяется типом ключевых элементов преобразователя, он может составлять $0,2\div 1$ мкс.

Как известно из теории переходных процессов, подача на обмотку асинхронного двигателя (АД) импульса прямоугольной формы с большой скоростью нарастания вызывает протекание в обмотке волновых процессов (ВП). Под волновыми процессами следует понимать весь сложный комплекс физических явлений, сопровождающих возникновение, распространение и быстрое изменение электромагнитного поля цепи или системы. Эти явления вызывают в обмотке значительное перенапряжение, что отрицательно влияет на изоляцию двигателя, при этом прочность и долговечность машины ухудшается. Кроме того, при быстром нарастании напряженности электрического поля на

фронте волны в изоляции машины возникают заметные электрические потери.

Изучению волновых процессов в электрических машинах и трансформаторах посвящено большое количество работ, которых ранее проводились в основном с целью поиска защиты от грозových перенапряжений. Однако, в настоящее время необходимо также рассматривать волновые явления в электрических машинах, работающих совместно с полупроводниковыми преобразователями частоты, и исследовать их влияние на изоляцию с целью прогнозирования надежности и долговечности асинхронных двигателей. Для изучения этих явлений можно использовать современную компьютерную технологию, математическое моделирование и проводить эксперименты для оценки адекватности математических моделей, когда это можно сделать.

Целью данной работы является расчет емкостных параметров и составление математических моделей для отыскания перенапряжения в разных точках обмотки АД. Для этого были использованы размеры, обмоточные данные и свойства материалов АД, который выпускается фирмой ELECTRO-INDUSTRIES .AZAZGA (АЛЖИР) с номером идентификации 2234- □041.

Методика расчета емкостных параметров [1,2,3,4,5,6]

Расчет емкостных параметров является одним из самых важных этапов в процессе математического моделирования волновых процессов в обмотках АД, от них зависит так называемое первоначальное распределение напряжения по емкостям обмотки. Схема замещения обмотки в

этой стадии превращается в чисто емкостную цепь с входной емкостью $C_{вх}$.

Рассматриваемая асинхронная машина имеет выпнуную двухслойную концентрическую обмотку со случайным расположением проводников в пазу, для расчета её емкостных параметров принимается ряд допущений:

1. Неоднородная изоляция в пазу АД заменяется однородной с учетом неплотного заполнения паза медью и изоляцией. Полагается, что картина электрического поля отдельно взятого проводника при расчете его емкости относительно корпуса или двух проводников при определении емкости между ними не зависит от остальных проводников.

2. Не учитывается влияние краевого эффекта в связи с тем, что электрическое поле в пазовой части мало искажается вблизи углов за счет экранирующего влияния стенки паза, а наличие краевого эффекта в лобовых частях вносит небольшую погрешность.

3. Поперечная емкость секции принимается равной суммарной емкости относительно корпуса проводников, находящихся в наружном слое секции. Емкость проводников, лежащих во внутренних слоях, на несколько порядков меньше емкости проводников наружного слоя, так как емкость отдельного проводника относительно корпуса обратно пропорциональна квадрату расстояния до корпуса, а число проводников во внутренних слоях обычно меньше.

Число проводников наружного слоя секции, прилегающих к стенкам паза, может быть подсчитано по формуле:

$$n_i = \frac{\Pi_n}{d'}, \quad (1)$$

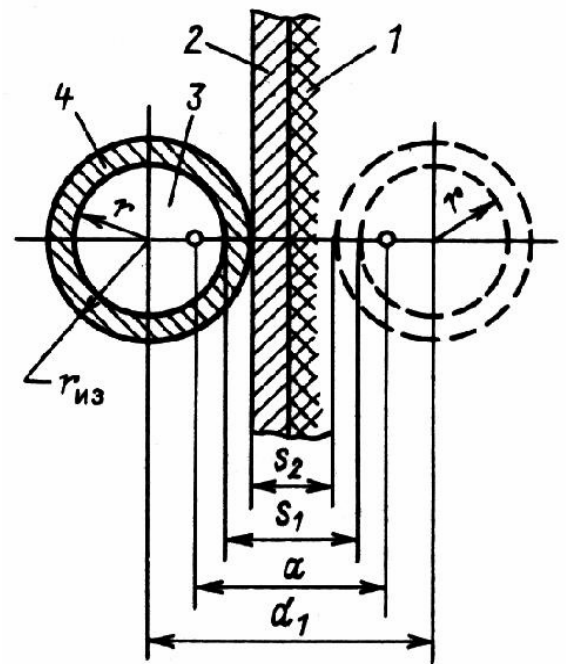
где Π_n – периметр свободной площади паза; d' – расстояние между центрами соседних проводников с учетом коэффициента заполнения паза (рис.1) которое равно:

$$d' = 2r_{из} \frac{1.075}{\sqrt{k_3}}, \quad (2)$$

где $r_{из}$ – радиус изолированного

проводника обмотки.

Для нахождения емкости проводника относительно корпуса реальный проводник зеркально отображается относительно стенки паза (рис.1), исключается из рассмотрения стенка паза 1 и корпусная изоляция 2, а отображенный провод заменяется реальным. Расстояние между проводником обмотки и его отображением, необходимое для вычисления емкости этого проводника, находится по формуле:



1 – стенка паза; 2 – корпусная изоляция; 3 – проводник; 4 – витковая изоляция.

Рис.1. К определению емкости проводника относительно корпуса

$$d_1 = 2 \frac{1.075}{\sqrt{k_3}} (\delta_n + r_{из}), \quad (3)$$

где δ_n – толщина пазовой изоляции.

Расстояние между электрическими осями реального и отображенного проводников:

$$a = \sqrt{d_1^2 - 4r^2}, \quad (4)$$

где r – радиус проводника без изоляции.

Тогда можно найти расстояния:

$$s_1 = d_1 - 2r; \quad s_2 = d_1 - 2r_{из} \quad (5)$$

Емкость i -го проводника секции, прилегающего к стенке паза, равна:

$$C_i \approx \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_r K_1 + (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_r) K_2}, \quad (6)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей изолированные провода; ε_{r1} – то же изоляции проводников;

$$K_1 = \ln\left(\frac{a+s_1}{a-s_1}\right); \quad K_2 = \ln\left(\frac{a+s_2}{a-s_2}\right) \quad (7)$$

В качестве относительной диэлектрической проницаемости среды, окружающей изолированные провода, следует принимать среднее значение:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{r2} + 1}{2}, \quad (8)$$

где ε_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость пропиточного лака; 1 – то же для воздуха.

Емкость секции определяется по формуле:

$$C_c = 2l_n n_i C_i, \quad (9)$$

где l_n – длина паза статора.

Емкость между смежными изолированными проводниками находится по (6) как $C_i/2$ с заменой d_1 на d' ; Продольная емкость секции, включая лобовые части, находится как:

$$K_c = \frac{K_i}{(w-1)k_n} l_b, \quad (10)$$

где w – число эффективных проводников в пазу; l_b – длина одного витка обмотки; $k_n \approx 0.08$ – статистический коэффициент перемешивания проводников при их насыпной укладке.

Емкость одной фазы обмотки статора относительно корпуса будет:

$$C_\Phi = K_2 \frac{Z}{6} C, \quad (11)$$

где Z – число пазов статора, $K_2 = 1,06$ для закрытых машин.

Входная емкость будет:

$$C_{Bx} = \frac{C_\Phi}{2N} \sqrt{\frac{C+K}{C}}, \quad (12)$$

где N – число катушек в фазе.

Расчет по данной методике даёт для исследуемого двигателя следующие

значения:

$$C = 2652 \text{ нФ}, \quad K = 51,12 \text{ нФ}, \quad C_\Phi = 22490 \text{ нФ}, \\ C_{Bx} = 1419 \text{ нФ}.$$

Таким образом, входная емкость составляет около 6,31% от емкости фазы. $C_{Bx} = 0,0631 \cdot C_\Phi$, что считается вполне удовлетворительным.

Здесь междуфазная емкость не учитывается, так как величина волнового напряжения, индуктированного в соседней фазе, незначительна[2],

Расчет перенапряжений в обмотках[7,8,9,10,11]

Для того, что бы аналитически рассчитать перенапряжение в обмотке

АД необходимо решить дифференциальное уравнение ВП, которое записывается для схемы замещения (рис.2).

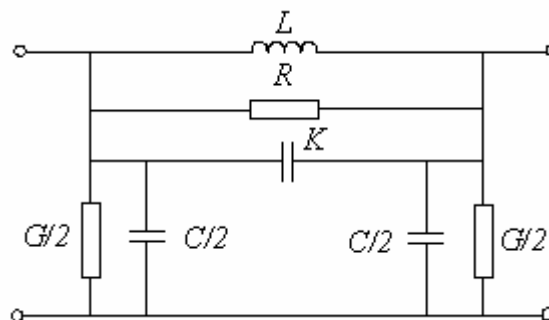


Рис.2. Схема замещения одного звена фазы обмотки АД

Распределение напряжений в рассматриваемой схеме описывается уравнением в частных производных гиперболического типа.

$$K \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} + g \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \Gamma \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - G \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$g = 1/R, \quad \Gamma = 1/L$$

Здесь координата x непрерывно изменяется в пределах $0 \leq x \leq l$, l – длина проводников параллельной ветви фазы обмотки. Условно принимаем за положительное направление изменения

координаты x противоположное движению падающей волны, то есть от конца обмотки ($x = 0$) к ее началу ($x = l$).

Все параметры, входящие в это уравнение даны для единицы длины. Поэтому размерности параметров будут:

для продольной ветви:

индуктивность $[L] = \Omega/M$;

сопротивление $[R] = \Omega/M$;

продольная емкость $[K] = \Phi \cdot M$;

для поперечной ветви:

поперечная емкость $[C] = \Omega/M$;

проводимость $[G] = 1/\Omega \cdot M$.

Уравнение было решено методом Фурье, для этого были заданы предварительно начальные и граничные условия. Эти условия определяются физической природой явлений в обмотке, а также схемой соединения. Они были сформулированы следующим образом: на обмотку падает волна напряжения, характеризуемая уравнением:

$$u_{\text{инн}}(t) = U \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{при } t > 0, \quad (14)$$

где U - амплитуда импульса равна 10В

α и β - некоторые постоянные равные:

$$\alpha = 2,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}, \quad \beta = 5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}.$$

Начальные условия считались нулевыми. Такое состояние характеризуется следующим уравнением:

$$\frac{\partial^3 u(x,0)}{\partial^2 x \partial t} = \gamma^2 \frac{\partial u(x,0)}{\partial t}, \quad (15)$$

где $\gamma = \sqrt{C/K}$.

Конец обмотки изолирован, граничные условия следующие:

*для начала обмотки $U(l,t) = u_{\text{инн}}(t)$; см. уравнение (14).

*для конца обмотки ($x=0$).

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0. \quad (16)$$

Следует отметить, что при решении уравнений методом Фурье было принято учитывать зависимость параметров R , L и G от частоты методом итераций [3].

Результаты моделирования представлены на рис 3,4 и 5.

Как видно на (рис.1) ВП в обмотке начинается с резкого увеличения напряжения из-за быстрого нарастания

напряжения исходного импульса и заряданий продольной и поперечной емкостей обмотки. Как только значение напряжения исходного импульса начинает перестает изменяться, начинается колебательный процесс из-за влияния индуктивности обмотки на ВП, последняя стадия процесса, это затухание колебаний за счет влияния сопротивления обмотки.

На рис.4 представлено распределение напряжения по длине параллельной ветви для разных моментов времени. Можно заметить, что оно становится более равномерное с увеличением времени ВП.

На рис.5 построена зависимость пиковых значений напряжений от номера секций, позволяющая определить участки обмотки, для которых перенапряжения представляют наибольшую опасность.

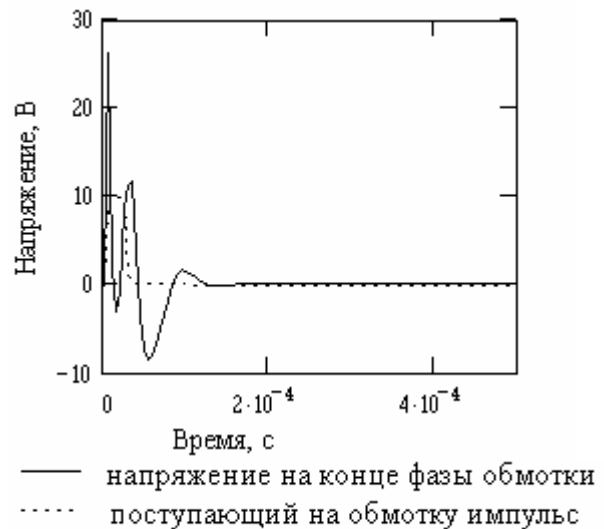
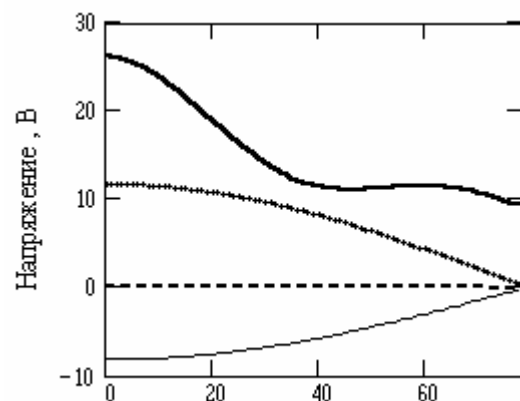


Рис.3. Волновой процесс в фазе обмотки двигателя



Длина параллельной ветви обмотки, м

- Для момента времени $t = 5 \cdot 10^{-6}$, с
- · · Для момента времени $t = 15 \cdot 10^{-6}$, с
- Для момента времени $t = 35 \cdot 10^{-6}$, с
- Для момента времени $t = 3 \cdot 10^{-4}$, с

Рис.4. Распределение напряжения по длине параллельной ветви для разных моментов времени

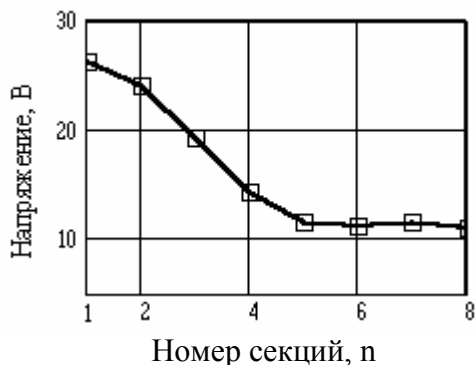


Рис.5. Зависимость значений максимальных напряжений от номера секций

Выводы

При поступлении на обмотку АД импульсов напряжения прямоугольной формы, схожих по форме с импульсами при частотном управлении от ШИМ, в ней возникают ВП. При этом расчетные перенапряжения по данному методу превышают напряжение исходного импульса. Расчет многих вариантов показал, что эти перенапряжения могут достигать значений в 2 раза превышающих амплитуду входного напряжения, а процесс в любой точке обмотки имеет характер затухающего колебания (рис3,4).

Видно также, что изменение напряжения имеет замедленный характер в конце обмотки, (рис5.).

Та как перенапряжений в машинах, питаемых от ШИМ-преобразователей, являются опасными для изоляций машины, целесообразно предусмотреть меры защиты от них[9,11].

Список литературы

1.Каганов З.Г. Волновые явления в

электрических машинах. Новосибирск: АН СССР,1964.

2.Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. М.: Энергия, 1970, с.208.

3.Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. М.: Энергоатомиздат,1990,с.248.

4.Геллер Б., Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах. М.: Энергия, 1973,с,440.

5.Горбунов Ю.К. Емкостные параметры высыпной обмотки статора асинхронных Двигателей// Электротехника.1987. №9.

6. Guardado J.L., Cornik K.J. Calculation of Machine Winding Electrical Parameters At High Frequencies for Switching Transient Studies//IEEE Trans. on Energy Conversion. 1996/ Vo.11. No1.

7. Горбунов Ю.К. Расчет собственных и взаимных активно-индуктивных волновых параметров катушек обмотки статора электрических машин//Изд.СО АН СССР.Сер.техн.наук.1978.Вып. 1,№3.

8. Binder A. Armature Insulation Stress Of Low Voltage A.C. Motors Due To Inverter Supply// SIEMENS. Bad Neustadt. Germany). С.5.

9. Toliyat H.A., Suresh G., Abur A. Estimation of Voltage Distribution On The Fed Random Wound Induction Motor Winding Supplied Through Feeder Cable// IEEE Power Engineering Review 1999. No. 1. Vol. 19.pp.56-59.

10. БЕСПАЛОВ В.Я., ЗВЕРЕВ К.Н. Импульсные перенапряжений, в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ преобразователя//Электротехника. 1999. № 9, С.56.

11. John D. Kueck, Howard D.Haynes, Robert H. Stfuntjn. Stator Insulation Degradation test uses ASD switching Frequency//IEEE Power Engineering January 2002Volume 22 Number 1.pp.7-11.

Беспалов Виктор Яковлевич – профессор кафедры электромеханики МЭИ. Окончил в 1960 г. электромеханический факультет МЭИ. в 1992 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Асинхронные Машины для динамических режимов работы».

Шетат Бухемис - Директор Научно-исследовательской Лаборатории Электрфикации промышленных предприятий Бумердасского (BOUMERDES) Университета, АЛЖИР, Кандидатскую Диссертацию защитил в МЭИ в 1989 г.

Государственная межвузовская комиссия присвоила автору Доктора Технические Наук. 1997.

Белассел Моханд-Тахар сотрудник Департамента «Электротехника» Тизиузувского Университета АЛЖИР. Член Научно-исследовательской Лаборатории Электрфикации промышленных предприятий Бумердасского (BOUMERDES) Университета, в 1993 г. защитил «Magister» по электротехнике в Тизиузувском Университете АЛЖИР.