

УДК 681.527.2

DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-40-48

ДИАГНОСТИКА МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Д. А. Жуйков, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Для построения отказоустойчивого управления необходимо знать все дефекты электрического двигателя, соответствующие диагностические признаки и средства по их измерению. Одними из наиболее распространенных дефектов электрического двигателя являются межвитковые замыкания в обмотке двигателя. По закономерностям изменения параметров двигателя при возникновении дефектов электрического двигателя можно реализовать его диагностику. Затем можно реализовать отказоустойчивое управление с учетом типа и степени развития неисправности.

Целью данной статьи является определение влияния межвитковых замыканий обмотки бесколлекторного двигателя постоянного тока на его характеристики на примере двигателя JK42BLS01.

В работе построена математическая модель двигателя, описана зависимость сопротивления, индуктивности и постоянной двигателя от количества витков обмотки; проведен вычислительный эксперимент по моделированию работы двигателя при различном количестве витков обмотки; на базе результатов моделирования построены графики, которые показывают зависимость следующих характеристик электрического двигателя от межвитковых замыканий: пускового, холостого тока и тока при номинальной нагрузке двигателя; пускового, холостого момента и момента при номинальной нагрузке двигателя; угловой скорости при холостых оборотах и при номинальной нагрузке.

Ключевые слова: диагностика, межвитковое замыкание, бесколлекторный двигатель постоянного тока.

Введение

Бесколлекторные двигатели постоянного тока (далее БДПТ) нашли широкое применение в мехатронных системах, например, в БПЛА, станках ЧПУ, мобильных и манипуляционных роботах.

Известно, что 40 % неисправностей электродвигателей связано с межвитковыми замыканиями. Причиной межвитковых замыканий является разрушение изоляции обмоток. Изоляция разрушается из-за механического воздействия на обмотки, перегрева обмоток, воздействия влаги на обмотки и т. д. Целью данной статьи является диагностика межвитковых замыканий и исследование их влияния на характеристики БДПТ. Исследованию и диагностике электродвигателей посвящены работы [1–10].

В качестве объекта исследования использован БДПТ JK42BLS01. Данный двигатель имеет три фазы, которые соединены треугольником. Каждая фаза состоит из двух катушек, соединенных последовательно.

Зависимость параметров БДПТ от межвитковых замыканий

В основу исследования легла гипотеза, что межвитковое замыкание на каком-то участке – это просто уменьшение количества витков обмотки. Из этого следует, что, если уменьшается количество витков, то уменьшается и длина эффективной части катушки. Из известной формулы

$$R_a = \frac{l \cdot \rho}{S}, \quad (1)$$

где l – длина провода катушки; R_a – активное сопротивление катушки; ρ – удельное электрическое сопротивление меди; S – площадь поперечного сечения провода катушки; можно утверждать, что изменение длины провода катушки влечет за собой изменение сопротивления. Также можно утверждать, что изменение количества витков влечет за собой изменение индуктивности, в [11] можно найти формулу для многослойной катушки без сердечника, которая это подтверждает:

$$L_1 = L_0 \cdot w^2 \cdot D_n \cdot 10^{-7}, \quad (2)$$

где L_1 – индуктивность многослойной катушки без сердечника, L_0 – коэффициент, определяемый из графика, w – количество витков катушки, D_n – наружный диаметр обмотки.

Определить индуктивность многослойной катушки с сердечником можно по следующей формуле из [12]:

$$L = L_1 \cdot \mu, \quad (3)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость.

Чтобы получить зависимость сопротивления и индуктивности от количества витков необходимо знать следующие параметры катушки:

$d = 0,32$ мм – диаметр витка катушки;

$D_n = 17,25$ мм – наружный диаметр обмотки;

$D_{вн} = 11,25$ мм – внутренний диаметр обмотки;

$l_n = 5,6$ мм – длина обмотки;

$R_a = 2,1$ Ом – сопротивление обмотки без межвитковых замыканий;

$L = 1,8$ мГн – индуктивность обмотки без межвитковых замыканий.

Эти данные были получены путем измерения одной катушки БДПТ JK42BLS01. Поскольку катушка индуктивности двигателя не совсем круглая, наружный и внутренний диаметры считались, как среднее значение. Зная их, можно определить длину провода катушки по формуле

$$l = \frac{S \cdot R_a}{\rho},$$

Для удобства расчета зависимостей определим количество витков на каждом слое катушки:

$$n = \frac{l_n}{d}.$$

Коэффициент L_0 определяется из графика с помощью двух отношений [13]:

$$\frac{t}{D_n}, \frac{l_n}{D_n}, \quad (4)$$

где t – глубина намотки, которая определяется по формуле

$$t = \frac{D_n - D_{вн}}{2}.$$

С изменением количества витков, отношения (4) будут меняться, а значит, изменится и L_0 , но в данной статье L_0 будет считаться постоянной величиной.

Количество витков обмотки без межвитковых замыканий можно узнать, умножив количество витков на каждом слое на количество слоев:

$$w = n \cdot N,$$

где N – количество слоев катушки, которое можно получить по формуле

$$N = \frac{t}{d}.$$

После чего можно посчитать индуктивность такой катушки по формуле (2) и посчитать относительную магнитную проницаемость, зная индуктивность целой катушки, по формуле:

$$\mu = \frac{L}{L_1}.$$

Кроме того, от числа витков зависит постоянная ЭДС и постоянная момента, примем их равными друг другу (далее постоянная двигателя), а зависимость постоянной двигателя от числа витков будем считать по следующей формуле из [14]:

$$K = \frac{w}{2\pi} \cdot \Phi, \quad (5)$$

где K – постоянная двигателя; Φ – магнитный поток, который создается постоянными магнитами. Мы можем рассчитать его, так как нам известно количество витков.

Поскольку каждая фаза состоит из двух последовательно соединенных катушек, а фазы соединены треугольником, для простоты будем считать, что межвитковое замыкание происходит в каждой фазе в каждой из катушек. Сопротивление обмотки в таком случае можно рассчитать по формуле

$$Ra = \frac{8}{6} \cdot R,$$

где R – сопротивление одной катушки.

Индуктивность обмотки будет определяться по аналогичной формуле.

Далее, уменьшая количество витков каждой из катушек на количество витков одного слоя катушки (в данном случае на 10,7 %), можно с помощью формул (1), (3) и (5) построить графики зависимости сопротивления, индуктивности и постоянной двигателя от количества витков обмотки. Для этого был написан код программы, показанный на рис. 1, в программном продукте Matlab. Данная программа производит все необходимые расчеты и строит графики зависимостей.

```

d=0.32*10^(-3); % диаметр витка
Lo=1.8*10^(-3); % индуктивность обмотки (фазаА-фазаВ)
L=Lo*6/8; % индуктивность одной катушки
Pi=3.14159265358979; % число Пи
Dn=17.25*10^(-3); % наружный диаметр обмотки
Dvn=11.25*10^(-3); % внутренний диаметр обмотки
q=1.7*10^(-8); % удельное электрическое сопротивление меди
S=(Pi*d*d)/4; % площадь поперечного сечения проводника
ln=5.6*10^(-3); % длина обмотки
Ro=2.1; % сопротивление обмотки(фазаА - фазаВ)
R=Ro*6/8; % сопротивление одной катушки одной фазы
Kt=0.042; % постоянная момента
% % Для одной катушки
l=(S*R)/q; % длина провода, из которой состоит катушка
t=(Dn-Dvn)/2; % глубина намотки
n=ln/d; % количество витков на верхнем слое
N1=t/d;% количество слоев
w=N1*n; % количество витков
F=(2*Pi*Kt)/(6*w); % магнитный поток
k1=t/Dn; % для графика (из графика выбираем L0)
k2=ln/Dn;
L0=7.4;
L1=L0*w*w*Dn*10^(-7); % индуктивность без сердечника
u=L/L1; % относительная магнитная проницаемость
percent=n/w*100; %процент, на который мы
%изменяем количество витков
N=uint8(N1);
if N<N1
    N=N+1;
end
% % Для всей обмотки
w3(1:N+1)=0; % количество витков(массив)
L3(1:N+1)=0; % индуктивность(массив)
R3(1:N+1)=0; % сопротивление(массив)
Kt3(1:N+1)=0; % постоянная момента(массив)
w3(1)=w; % начальные данные
L3(1)=L;
R3(1)=R;

Kt3(1)=Kt;
w4=w3;
w1=w*6; %% для всей обмотки
w4(1)=w1;
n1=n*6;
for j=2:N
    w=w-n;
    w1=w1-n1;
    w4(j)=w1;
    w3(j)=w;
    Kt3(j)=(w1*F)/(2*Pi); % изменение постоянной момента
    Dn=Dn-2*d; % изменение наружного диаметра катушки после того,
    %как убрали какое-то количество витков(1 слой)
    L1=L0*w*w*Dn*10^(-7); % изменение индуктивности одной катушки
    L=L1*u; % с учетом сердечника
    L3(j)=L;
    d1=Pi*Dn*n; % длина, на которую уменьшаем
    l=l-d1; % изменение длины провода катушки
    R=l*q/S; % пересчет, как изменится сопротивление
    R3(j)=R;
end
R3=R3*8/6; % С учетом того, что фазы соединены треугольником
L3=L3*8/6;
subplot(3, 1, 1),plot(w4,R3),grid;
title('Сопротивление, R')
xlabel('w, количество витков'), ylabel('R, Ом')

subplot(3, 1, 2),plot(w4,L3),grid;
title('Индуктивность катушки, L')
xlabel('w, количество витков'), ylabel('L, Гн')

subplot(3, 1, 3),plot(w4,Kt3),grid;
title('Постоянная двигателя, K')
xlabel('w, количество витков'), ylabel('K')

```

Рис. 1. Код программы, строящей графики зависимостей сопротивления, индуктивности и постоянной двигателя от количества витков

В результате выполнения программы получены следующие графики зависимостей, показанные на рис. 2, а данные, которые использовались программой для построения этих графиков, занесены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры двигателя при различном количестве витков в катушке

Количество витков, w	Сопротивление катушки, R , Ом	Индуктивность катушки, L , мГн	Постоянная двигателя, K
984,37	2.100	1,8000	0,0420
879,37	1.843	1,4000	0,0375
774,37	1.595	1,0300	0,0330
669,37	1.357	0,7396	0,0286
564,37	1.130	0,5038	0,0241
459,37	0.912	0,3192	0,0196
354,37	0.705	0,1814	0,0151
249,37	0.507	0,0855	0,0106
144,37	0.318	0,0272	0,0062
39,37	0.140	0,0019	0,0017
0	0	0	0

Из таблицы видно, что на первом слое катушка намотана не полностью, разумеется, что это не так. Связано это с погрешностью измерения параметров катушки и с тем, что катушка электродвигателя на самом деле не имеет четких слоев, но для удобства расчета мы считаем, что они есть.

Как видно из графика на рис. 2, зависимость сопротивления катушки и постоянной двигателя от количества витков – линейная, а зависимость индуктивности катушки – квадратичная. Небольшое начальное отклонение графика сопротивления связано с погрешностью измерения сопротивления катушки и ее геометрических параметров.

Сопротивление от длины действительно зависит линейно, но стоит отметить, что в данном случае катушки, из которых состоит обмотка, многослойные, а это значит, что с уменьшением витков на одно и то же значение с каждым разом длина обмотки уменьшаться будет все меньше и меньше, поскольку меняется внешний диаметр катушки. Значит, и сопротивление будет уменьшаться все меньше и меньше с каждым слоем катушки.

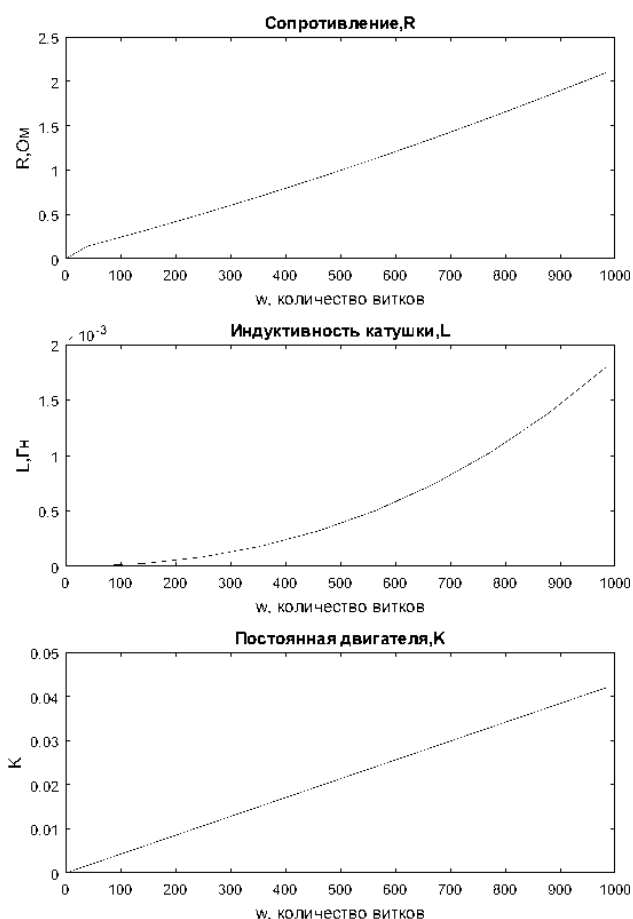


Рис. 2. График зависимости сопротивления, индуктивности и постоянной момента от числа витков катушки

Моделирование привода

С помощью этих графиков можно наблюдать, как влияет межвитковое замыкание на характеристики БДПТ. Для этого построим в программном продукте Matlab, в пакете Simulink, модель двигателя. Воспользуемся моделью двигателя из [15], только добавив коэффициент демпфирования. Полученная модель показана на рис. 3.

Все параметры и коэффициенты указаны для двигателя JK42BLS01:

$U = 24$ В – номинальное напряжения двигателя;

L – индуктивность обмотки двигателя;

R_a – сопротивление обмотки двигателя;

K – постоянная двигателя;

$J = 24$ гсм² – момент инерции ротора двигателя;

$K_f = 0,00002$ – коэффициент демпфирования;

$M_n = 0,0625$ Нм – номинальная нагрузка двигателя.

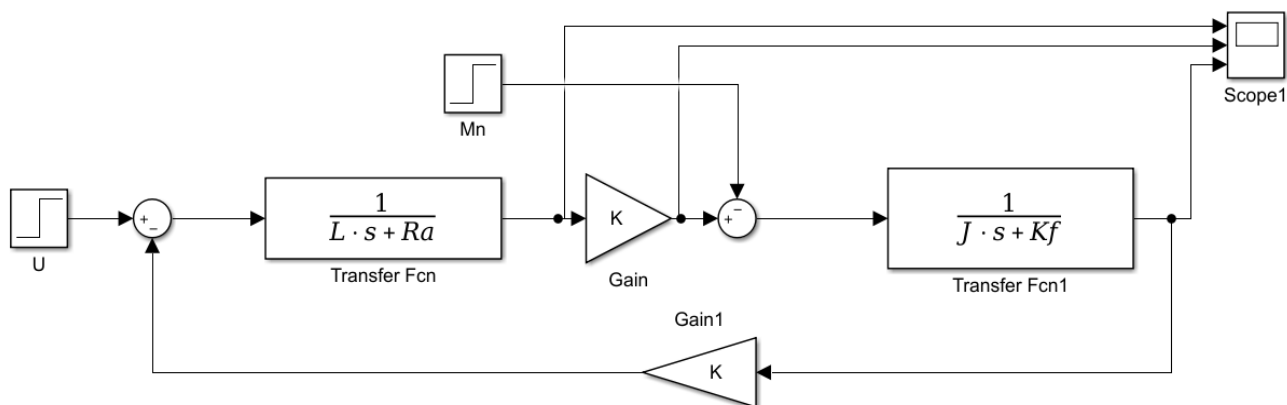


Рис. 3. Модель БДПТ

Моделирование состоит из запуска двигателя при 24 В на 0,1 с и нагружении двигателя номинальной нагрузкой 0,0625 Нм на 0,3 с. На рис. 4 показаны графики зависимости тока, момента и угловой скорости от времени без межвитковых замыканий.

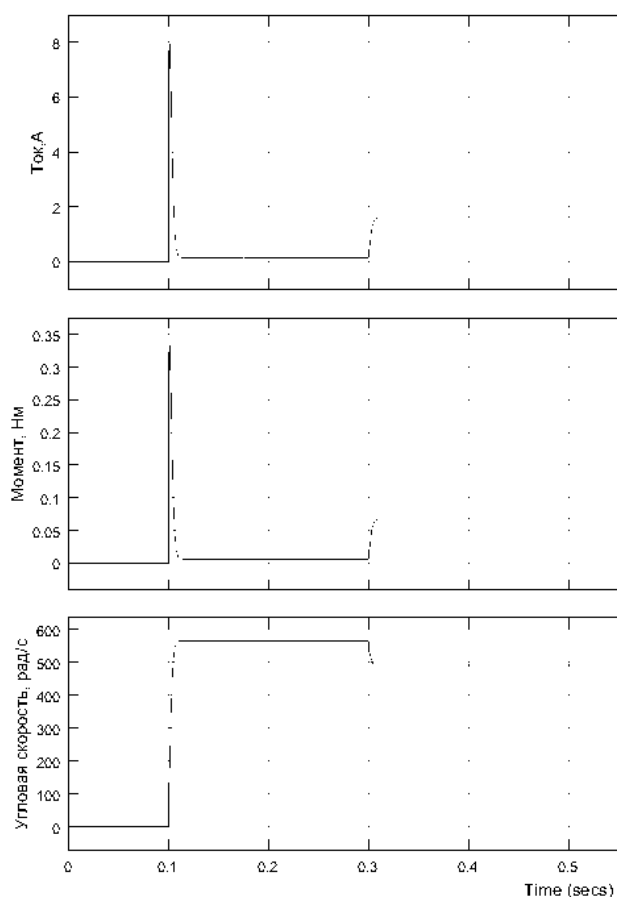


Рис. 4. График зависимости электрического тока, момента и угловой скорости БДПТ от времени без межвитковых замыканий

Из графика видно, что пусковой ток равен 7,95 А, ток холостого хода равен 0,13 А, ток при нагрузке равен 1,6 А, угловая скорость на холостом ходу равна 565 рад/с, угловая скорость при нагрузке равна 491 рад/с.

Если теперь мы снимем 1 слой витков (10,7 % от общего числа витков) каждой катушки, то получим следующие графики, показанные на рис. 5.

Из графиков можно заметить, как возрос пусковой ток, момент и угловая скорость. В данном случае пусковой ток равен 9,2 А, ток холостого хода равен 0,16 А, ток при нагрузке равен 1,82 А, угловая скорость на холостых оборотах равна 632 рад/с, угловая скорость при нагрузке равна 551 рад/с.

Если снять 3 слоя витков (32 % от общего числа витков) каждой катушки, то получатся следующие графики, показанные на рис. 6.

В данном случае пусковой ток равен 13,9 А, ток холостого хода равен 0,28 А, ток при нагрузке равен 2,44 А, угловая скорость на холостых оборотах равна 826 рад/с, угловая скорость при нагрузке равна 723 рад/с.

Таким образом, снимая слой за слоем, тем самым уменьшая количество витков, построим табл. 2, в которую занесем все полученные данные.

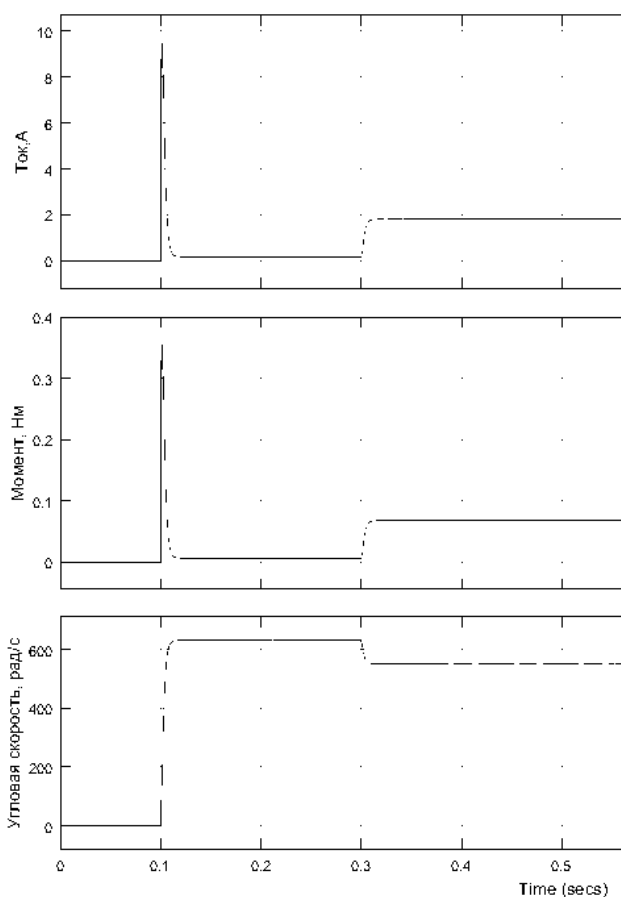


Рис. 5. График зависимости тока, момента и угловой скорости от времени с 10,7%-м межвитковым замыканием обмотки

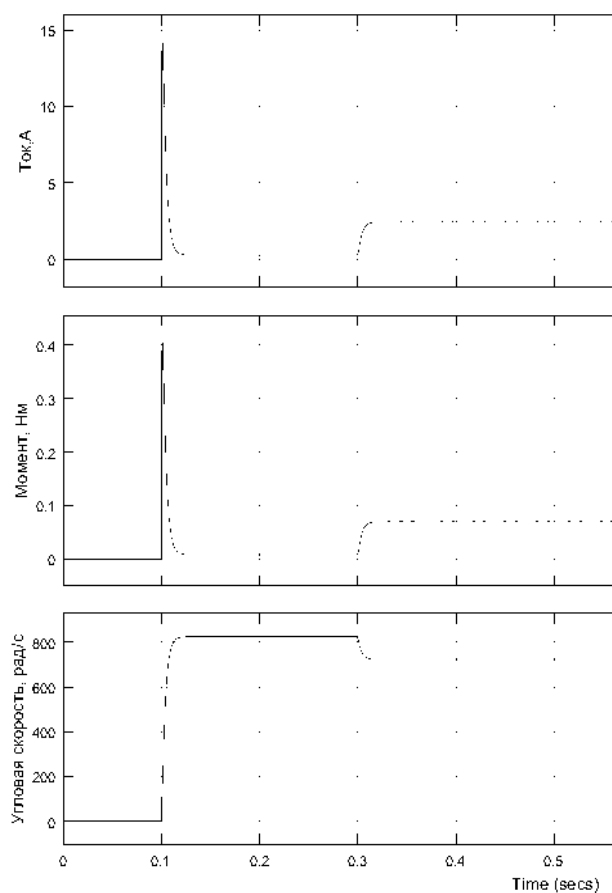


Рис. 6. График зависимости тока, момента и угловой скорости от времени с 32%-м межвитковым замыканием обмотки

Таблица 2. Зависимость параметров двигателя от количества витков

Кол-во витков	Пусковой ток, А	Ток холостого хода, А	Ток при нагрузке, А	Пусковой момент, Нм	Момент холостого хода, Нм	Момент при нагрузке, Нм	Угловая скорость на холостых оборотах, рад/с	Угловая скорость при нагрузке, рад/с
984,37	7,95	0,13	1,60	0,334	0,0056	0,062	565	491
879,37	9,20	0,16	1,82	0,345	0,0061	0,068	632	551
774,37	11,40	0,21	2,08	0,375	0,0071	0,069	717	627
669,37	13,90	0,28	2,44	0,397	0,0079	0,070	826	723
564,37	17,22	0,40	2,95	0,415	0,0097	0,071	977	857
459,37	22,56	0,59	3,73	0,449	0,0119	0,073	1196	1051
354,37	31,03	1,02	5,04	0,463	0,0153	0,076	1542	1354
249,37	44,67	2,02	7,69	0,469	0,0216	0,082	2166	1897
144,37	72,61	5,784	15,06	0,454	0,0359	0,093	3573	3096
39, 37	169,30	55,86	80,51	0,289	0,0949	0,137	9494	7455

С помощью данных из таблицы построим графики, показывающие зависимость параметров двигателя от количества витков.

Данные зависимости показаны на рис. 7 (для токов), 8 (для моментов) и 9 (для угловых скоростей).

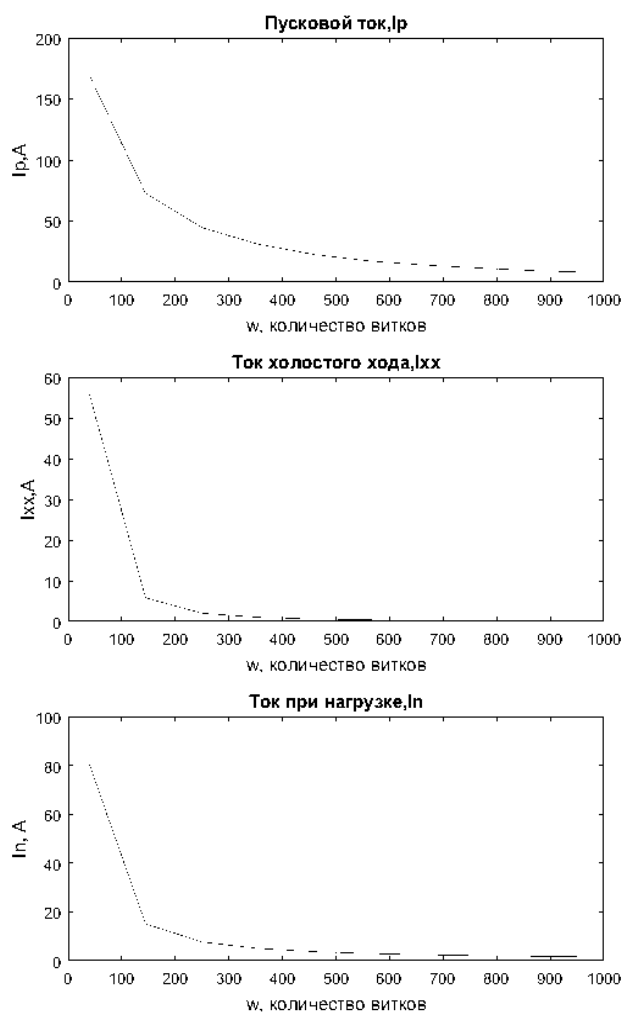


Рис. 7. Зависимость пускового тока, холостого тока и тока при нагрузке от количества витков

Как видно из графиков, увеличение количества межвитковых замыканий приводит к сильному росту силы тока, угловой скорости, момента при нагрузке и при холостых оборотах; пусковой момент также увеличивается, но при уменьшении количества витков до 75 % пусковой момент начинает уменьшаться. Падение пускового момента обусловлено следующим уравнением:

$$M_p = K \cdot I_p,$$

где M_p – пусковой момент; I_p – пусковой ток. В данном уравнении постоянная двигателя уменьшается всегда на одно и то же значение. Ток же зависит от сопротивления обмотки, а сопротивление с каждым слоем катушки уменьшается на все меньшую величину по сравнению с предыдущим слоем. Из-за этого и происходит падение пускового момента. Стоит отметить, что поведение пускового момента (падение или возрастание) при значительных межвитковых замыканиях будет зависеть от конструкции самого двигателя, т. е. от количества слоев обмотки, толщины провода обмотки и т. д.

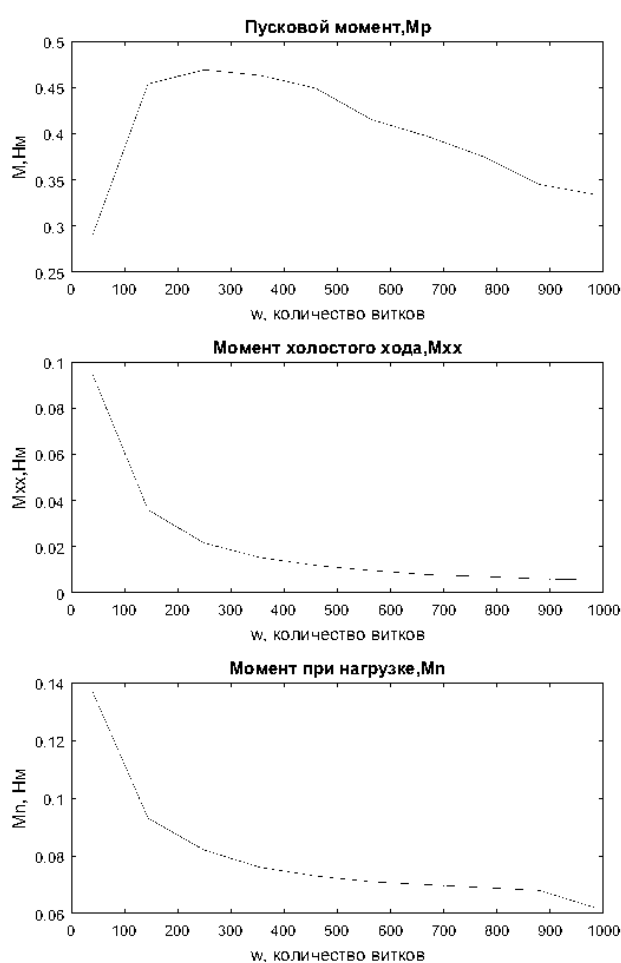


Рис. 8. Зависимость пускового момента, момента холостого хода и момента при нагрузке от количества витков

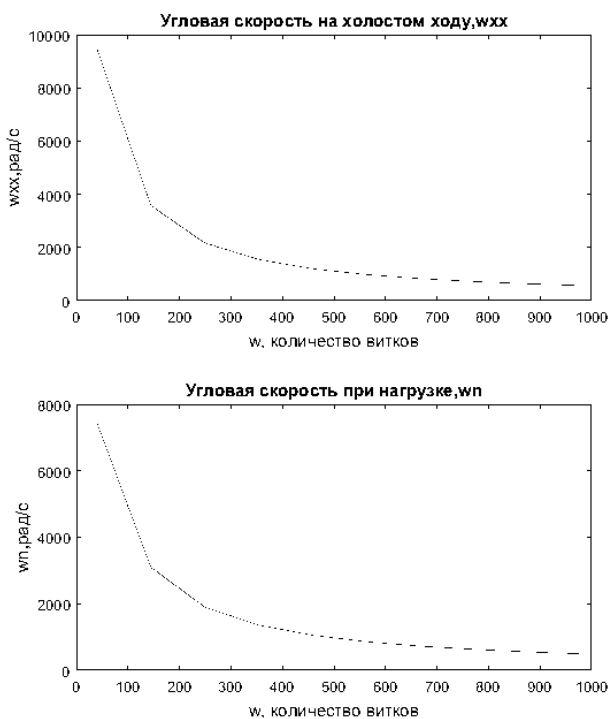


Рис. 9. Зависимость угловой скорости при холостом ходе и угловой скорости при нагрузке от количества витков

Момент же на холостом ходу и момент при нагрузке продолжает расти, так как с межвитковыми замыканиями падает противоЭДС, а за счет этого ток еще сильнее возрастает.

Выводы

При межвитковых замыканиях происходит значительное увеличение силы электрического тока (пусковой ток увеличивается почти в два раза при 32%-м межвитковом замыкании обмотки БДПТ), протекающего по обмотке, что может привести к еще большим межвитковым замыканиям, а это в свою очередь может привести к выходу из строя двигателя; при этом происходит значительное увеличение скорости вращения вала двигателя, что может привести к разрушению механических узлов двигателя, например, к выходу подшипников из строя. Применение системы диагностики позволит обнаруживать данные дефекты на ранних стадиях, до возникновения аварийных ситуаций.

Библиографические ссылки

1. Isermann R. *Combustion Engine Diagnosis. Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components*. Springer-Verlag GmbH, Germany, 2017, 313 p. ISBN 978-3-662-49466-0. DOI 10.1007/978-3-662-49467-7.
2. Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag, Berlin, 2006, 475 p. ISBN 978-3-540-30368-8.
3. Abramov I., Nikitin Y., Zorina O., Božek P., Stepanov P., Stollmann V. Monitoring of technical condition of motors and bearings of woodworking equipment. *Acta Facultatis Xylogologiae*, 2014, vol. 56(2), pp. 97–104. ISSN 1336-3824.
4. Abramov I.V., Nikitin Yu.R., Abramov A.I., Sosnovich E.V., Božek P. Control and diagnostic model of brushless DC motor. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 65, no. 5, pp. 277-282. ISSN 1335-3632. DOI: 10.2478/jee-2014-0044.
5. Диагностика систем приводов деревообрабатывающего оборудования с использованием нечеткой логики / И. В. Абрамов, А. И. Абрамов, Ю. П. Никитин, А. В. Романов // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1. С. 31–34. ISSN 1813-7991.
6. Никитин Ю. П., Абрамов И. В., Степанов П. И. Логико-лингвистическая модель диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса мехатронных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 79–87. ISSN 1813-7991.
7. Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. П. Комплексная токовая и вибродиагностика электромеханических систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2. С. 160–165. ISSN 1813-7991.
8. Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. П. Механические и электрические диагно-

стические параметры электрических приводов // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 59-63. ISSN 1813-7991.

9. Столбов К. Л., Никитин Ю. П. Диагностирование мотор-редукторов прокатной линии стана 250 // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 64–69. ISSN 1813-7991.

10. Диагностирование приводов мобильных роботов на базе модели двигателя постоянного тока / Ю. П. Никитин, С. А. Трефилов, А. И. Абрамов, И. В. Абрамов, Ю. В. Турыгин, А. В. Романов // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. № 4 (16). С. 114–121. ISSN 1813-7911.

11. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет / В. А. Возненко, А. В. Коваль, В. М. Коронкевич, И. М. Прищепа, В. И. Ростовиков ; под ред. А. В. Ковалю. М. : Сов. радио, 1977. 368 с.

12. Рычина Т. А. Электрорадиоэлементы : учебник для вузов. М. : Сов. радио, 1976. 336 с.

13. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет / В. А. Возненко, А. В. Коваль, В. М. Коронкевич, И. М. Прищепа, В. И. Ростовиков ; под ред. А. В. Ковалю. М. : Сов. радио, 1977. 368 с.

14. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1989. 184 с.

15. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. 288 с.

References

1. Isermann R. *Combustion Engine Diagnosis. Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components*. Springer-Verlag GmbH, Germany, 2017, 313 p. ISBN 978-3-662-49466-0. DOI 10.1007/978-3-662-49467-7.
2. Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag, Berlin, 2006, 475 p. ISBN 978-3-540-30368-8.
3. Abramov I., Nikitin Y., Zorina O., Božek P., Stepanov P., Stollmann V. Monitoring of technical condition of motors and bearings of woodworking equipment. *Acta Facultatis Xylogologiae*, 2014, vol. 56(2), pp. 97–104. ISSN 1336-3824.
4. Abramov I.V., Nikitin Yu.R., Abramov A.I., Sosnovich E.V., Božek P. Control and diagnostic model of brushless DC motor. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 65, no. 5, pp. 277-282. ISSN 1335-3632. DOI: 10.2478/jee-2014-0044.
5. Abramov I.V., Abramov A.I., Nikitin Yu.R., Romanov A.V. [Diagnostics of drive systems of woodworking equipment using fuzzy logic]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2015, no. 1. Pp. 31-34. ISSN 1813-7991 (in Russ.).
6. Nikitin Yu.R., Abramov I.V., Stepanov P.I. *Logiko-lingvisticheskaya model' diagnostirovaniya i prognozirovaniya ostatochnogo resursa mekhatronnykh ob"ektov* [Logical-linguistic model of diagnosing and predicting the residual life of mechatronic objects]. In-

tellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2013. – No. 2 (22). Pp. 79-87. ISSN 1813-7991 (in Russ.).

7. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Yu.R. [Complex current and vibration diagnostics of Electromechanical systems]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2013, no. 2. Pp. 160-165. ISSN 1813-7991 (in Russ.).

8. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Yu.R. [Mechanical and electrical diagnostic parameters of electric drives]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2014, no. 2 (24). Pp. 59-63. ISSN 1813-7991 (in Russ.).

9. Stolbov K.L., Nikitin Yu.R. [Diagnostics of motor-reducers of rolling mill line 250]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2014, no. 2 (24). Pp. 64-69. ISSN 1813-7991 (in Russ.).

10. Nikitin Yu.R., Trefilov S.A., Abramov A.I., Abramov I.V., Turygin Yu.V., Romanov A.V. [Diagnosis of mobile robot drives based on DC motor mode]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2018, no. 4 (16). Pp. 114-121. ISSN 1813-7911 (in Russ.).

11. Voznenko V.A., Koval' A.V., Koronkevich V.M., Prishchepa I.M., Rostovikov V.I. *Radiodetal, radi-*

okomponenty i ikh raschet [Radio components and their calculation]. Moscow, Soviet Radio Publ, 1977. 368 p. (in Russ.).

12. Rychina T.A. *Elektroradioelementy* [Electronic Radio Elements]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1976. 336 p. (in Russ.).

13. Voznenko V.A., Koval' A.V., Koronkevich V.M., Prishchepa I.M., Rostovikov V.I. *Radiodetal, radi-okomponenty i ikh raschet* [Radio components and their calculation]. Moscow, Soviet Radio Publ, 1977. 368 p. (in Russ.).

14. Kenio T., Nagamori S. *Dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami: Per. s angl.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 184 p. (in Russ.).

15. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ.; Saint-Petersburg., Piter Publ., 2008. 288 p. (in Russ.).

Diagnosics of Inter-turn Closures in Brushless DC Motors

D. A. Zhuykov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

To build a fault-tolerant control, it is necessary to know all the defects of the electric motor, the corresponding diagnostic features and the means for measuring them. One of the most common defects in the electric motor is the inter-turn circuit in the motor winding. According to the laws of change in the parameters of the engine in the event of defects in the electric motor, it is possible to implement its diagnosis. Then you can implement fault-tolerant control, taking into account the type and extent of malfunction.

The purpose of this paper is to determine the influence of the inter-turning circuits of the winding of a brushless DC motor on its characteristics using the example of the JK42BLS01 engine.

In this paper, a mathematical model of the engine was constructed, the dependence of resistance, inductance and constant motor on the number of windings was described; a computational experiment was conducted to simulate the operation of an engine with a different number of turns of the winding; on the basis of the simulation results, graphs have been constructed that show the dependence of the following characteristics of an electric motor on inter-turn circuits: the starting, idle current, and the current at the rated motor load; the starting, idle moment and the torque at the rated engine load; and the angular velocity at the idle and at the rated load.

Keywords: diagnostics, inter-turn circuit, brushless direct current motor.

Получено: 04.02.19