



А.В. Машкин, С.Б. Федотовский
 Вологодский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОДШИПНИКАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ШИМ

Управление силовым полупроводниковыми ключами по алгоритму широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в системах электропривода приводит к появлению синфазного напряжения и синфазного тока. В электрических машинах достаточно большой мощности это может вызвать индукцию напряжения на их подшипниках. Это приведет к протеканию тока в них и их коррозии, что в конечном итоге вызовет выход из строя подшипников. Для предсказания и уменьшения количества таких отказов в электрической машине необходимо при моделировании учитывать влияние высокочастотных импульсов на режимы ее работы.

Моделирование, электропривод, высокочастотные составляющие, преобразователи частоты, широтно-импульсная модуляция.

Управление по алгоритмам ШИМ широко используется в автоматизированном электроприводе (ЭП). Скорость нарастания питающего напряжения ($du(t)/dt$) в электрической машине увеличивается за счет использования устройств быстрой коммутации, таких как биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) и их различные разновидности. Потребность в системах электропривода с низким уровнем акустического шума и малыми потерями мощности привела к необходимости разработки высокочастотных коммутационных инверторов [1, 2]. Но высокочастотное переключение силовых полупроводниковых приборов может создать ряд проблем в системах ЭП, таких как перенапряжения в обмотках электрических машин, радиопомехи, электромагнитные помехи в источниках питания, подключенных к энергосети, содержащий такой ЭП. Высокочастотное переключение силовых полупроводниковых ключей в автономных инверторах (АИ) либо в широтно-импульсных регуляторах (ШИР) будет приводить к генерации импульсов синфазного напряжения (CMV – Common Mode Voltage). Воздействие этих токов может стать одной из причин выхода подшипников из строя. Импульсы CMV будут приводить к генерации высокочастотных синфазных токов, замыкающихся на землю. Эти токи являются дополнительными источниками электромагнитных помех, которые могут вызвать сбои в работе электронного оборудования и оказать негативное влияние на систему управления ЭП [3, 4]. В электрических машинах большой мощности, получающих питание от инвертора, CMV-токи, протекающие на землю, благодаря индуктивной связи могут вызвать индукцию заряда на подшипниках электрической машины. Как только индуцируемое за счет высокочастотных помех напряжение на подшипниках становится больше, чем напряжения пробоя

смазочного материала (1,5–30 В), через них начинают протекать разрядные токи, которые могут повредить подшипники [5, 6].

Имеются различные методы снижения высокочастотных CMV-импульсов напряжения и вызванных ими токов. К таким методам, например, относятся применение специальной топологии преобразователей, специальные алгоритмы модуляции силовых полупроводниковых ключей или использование различного рода фильтров, которые могут подавлять CMV-импульсы напряжения и вызванные ими токи. Но, как правило, реализация данных методов приводит к существенному удорожанию системы [7]. Поэтому решение об их использовании приходится применять выборочно для каждого типа приводной системы. Для обоснованного решения о применении данных методов необходим точный расчет CMV-напряжений и генерируемых ими токов в системе. Для этих целей можно использовать математические модели электрических машин, запитанных напряжением высокой частоты, для учета паразитных эффектов, вызванных генерацией высокочастотных CMV-импульсов напряжения. По своей структуре и методам определения параметров математические модели электрических машин переменного тока, получающих питание от высокочастотного источника переменного напряжения, можно подразделить на модели линий передач (TL – Transmission Line) и модели, представляющие свои элементы при помощи частотных характеристик. В моделях TL обычно используется большое количество параметров и с их помощью обычно нельзя обеспечить точный расчет CM-токов для любого типа двигателя. Распределенные обмотки электрических машин могут иметь различные конфигурации и их бывает трудно представить при помощи TL-моделей без существенных упрощений, что снижает точность моделирования. Альтернативой служат модели, пред-

ставляющие элементы системы при помощи частотных характеристик. Их преимущество заключается в простоте, но для определения параметров модели в этом случае необходимо экспериментальное измерение СМ-токов, ДМ-токов (Differential Mode – дифференциального режима) или полного сопротивления между нейтралью и землей. Существуют приемы, позволяющие упростить получение численных значений параметров для этой модели, однако они приводят к увеличению количества параметров математической модели. Поэтому создание математической модели электрической машины переменного тока, получающей питание от источника напряжения с высокой частотой и обладающей небольшим количеством параметров, несущих физический смысл как с точки зрения разработчика электрической машины, так и с точки зрения разработчика инвертора, является актуальной задачей.

Каждое переключение силовых полупроводниковых ключей, обеспечивающих коммутацию начал фазных обмоток между положительным и отрицательным полюсом источника постоянного напряжения на входе АИ напряжения (АИН), будет приводить к генерации СМ-импульсов тока. Суммарно СМ-импульсы тока i_{com} можно представить в виде линейной суперпозиции токов i_{UG} , i_{VG} и i_{WG} , протекание которых вызывается сгенерированными напряжениями u_{UG} , u_{VG} и u_{WG} , которые возникают при каждом переключении силовых ключей инвертора. Характер изменения токов i_{UG} , i_{VG} и i_{WG} представляет из себя затухающие колебания. Причем амплитуда колебаний данных токов уменьшится до нуля в машине с номинальной мощностью $P_n=240$ кВт примерно в течение 30 мкс, в то время как время переключения силовых полупроводниковых ключей при частоте модуляции 25 кГц будет составлять порядка 40 мкс [8]. Это позволяет описать изменение тока, используя простую модель RLC-цепочки (рис. 1) с параметрами R_1 , L_1 и C_1 .

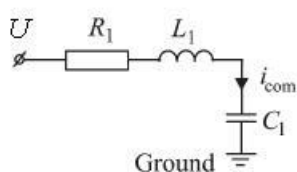


Рис. 1. Простая RLC-цепь для представления СМ-тока

В этом случае синфазный ток можно определить по формуле:

$$i_{com} \cong \frac{U}{Z_{01}} \cdot e^{-\xi_1 \cdot \omega_1 \cdot t} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t), \quad (1)$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$ – собственная (резонансная) циклическая частота RLC-цепочки для первой гармонической составляющей, Гц;

$$\xi_1 = \frac{R_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \text{ – коэффициент демпфирования колебаний тока на первой гармонической составляющей;}$$

$$Z_{01} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ – волновое сопротивление RLC-цепи,}$$

Ом.

Однако теоретических методов определения параметров R_1 , L_1 , C_1 по известным параметрам схемы замещения обмоток электрической машины не существует. Они могут быть определены только экспериментально путем снятия осциллограмм синфазных токов и сравнения их с расчетными значениями, полученными в результате математического моделирования. В этом случае выбираются те значения параметров R_1 , L_1 , C_1 модели, которые обеспечивают наиболее точное приближение рассчитанных синфазных токов к их значениям, снятым экспериментально.

Как правило, при скорости вращения более 300 об/мин смазочная пленка полностью покрывает ролики подшипника и электрически изолирует их от кольца подшипника. При заземленном корпусе статора АД переключение начал фаз обмоток статора при помощи силовых полупроводниковых ключей АИН, производящееся с достаточно большой частотой, будет приводить к образованию емкостного делителя напряжения между обмоткой статора АД, его ротором и подшипниками двигателя (рис. 2).

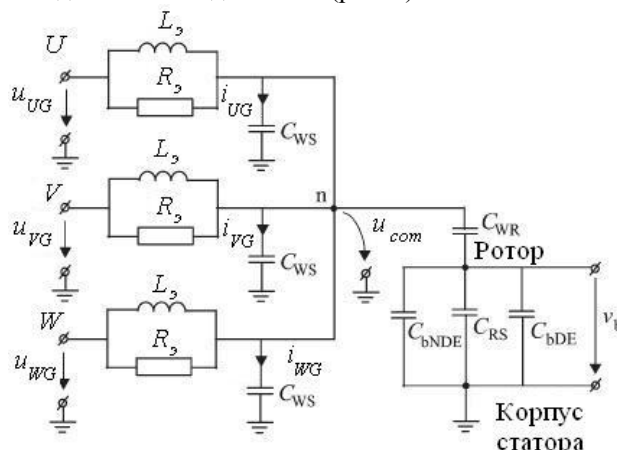


Рис. 2. Эквивалентная схема, показывающая процесс возникновения напряжения в подшипнике

В состав этого делителя входят: емкости между обмоткой статора и ротора C_{WR} ; емкости между корпусом статора и ротором C_{SR} ; емкости подшипника АД, расположенного со стороны приводимого в движение механизма C_{BDE} (BDE – Bearing Drive End, подшипник на приводной оси); емкости подшипника АД, расположенного со стороны вентилятора C_{NBDE} (NBDE – Non BDE, подшипник на неприводной оси). Полученный емкостный делитель напряжения может быть охарактеризован следующим коэффициентом:

$$BVR = \frac{u_b}{u_{com}} = \frac{C_{WR}}{C_{WR} + C_{RS} + C_{bDE} + C_{bNDE}}, \quad (2)$$

где u_b – напряжение на подшипниках, В;

u_{com} – сгенерированное синфазное напряжение на нейтрали, В.

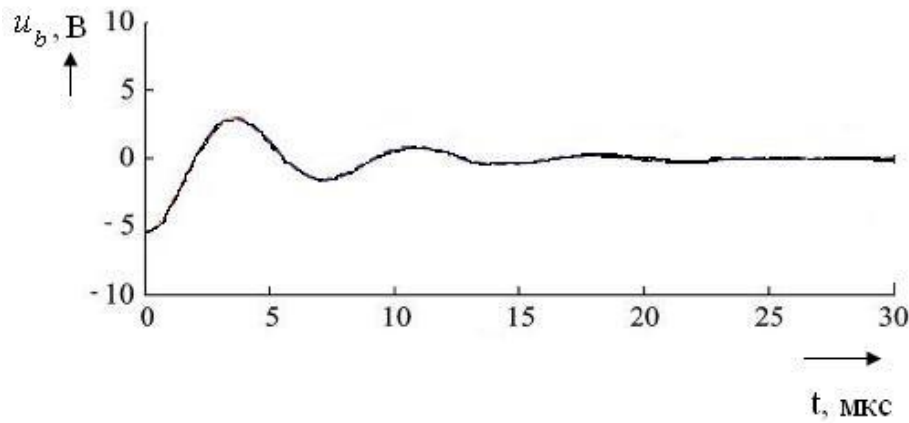


Рис. 3. Кривая напряжения

Напряжение u_{com} может быть вычислено следующим образом:

$$u_{com} = \frac{u_{UG} + u_{VG} + u_{WG}}{3} - \frac{u_{UN} + u_{VN} + u_{WN}}{3} = \frac{1}{3 \cdot C_{ws}} (\int i_{UG} dt + \int i_{VG} dt + \int i_{WG} dt), \quad (3)$$

где C_{ws} – это емкость между корпусом статора и той фазой АД, которая обеспечивает контур для протекающего СМ-тока;

u_{UN} , u_{VN} , u_{WN} – падение напряжения на активных и индуктивных сопротивлениях обмоток АД, вызванное протеканием СМ-тока.

Общий СМ-ток представляет из себя суперпозицию СМ-импульсов тока отдельных фаз i_{UG} , i_{VG} и i_{WG} . Паразитные емкости двигателя, указанные в (2), могут быть определены либо экспериментально, либо рассчитаны методами конечных элементов.

В случае переключения начала фазы АД, определяющего напряжение u_{VG} с одного полюса источника постоянного напряжения на другой, синфазный ток будет определяться только током данной фазы, т.е. $i_{com} = i_{VG}$, так как в этом случае токи $i_{UG} = 0$ и $i_{WG} = 0$. Из (2) и (3) следует, что напряжение на подшипнике можно определить следующим образом:

$$u_b = BVR \cdot \frac{1}{3 \cdot C_{ws}} \cdot \int i_{com} dt. \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражение для синфазного тока из (1) получаем, что напряжение на подшипнике изменяется по следующему закону:

$$u_b(t) \cong -\frac{BVR}{3 \cdot C_{ws}} \cdot \frac{U}{Z_{01} \cdot \omega_1} \cdot \frac{e^{-\xi_1 \cdot \omega_1 t}}{\xi_1^2 + 1} \cdot (\cos(\omega_1 \cdot t) + \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)). \quad (5)$$

В (5) для простоты записи пропущена постоянная интегрирования.

Если возможно провести измерения в нейтральной точке, то по результатам этого измерения можно вычислить напряжение на подшипниках, используя (2). Если такого измерения привести невозможно, то можно использовать синфазный ток, определяемый

через известные или легко измеряемые параметры АД и АИ, для определения напряжения на подшипниках по выражению (5). На рисунке 3 показана кривая напряжения на подшипнике, рассчитанная по (5) для АД с номинальной мощностью $P_n = 240$ кВт, вызванная переключением силовых полупроводниковых ключей АИН.

Таким образом, получены формулы, которые позволяют по известным параметрам электрической машины и питающего напряжения произвести процесс моделирования возникновения напряжения на подшипниках двигателя.

Литература

1. Energy model of electric drive of centrifugal borehole pump / Vodovozov A., Chernyaeva N., Zaripova D. A. [et al.]. – // E3S Web of Conferences: Intern. Scientific and Technical Conf. Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), 18–20 September, 2019. – Kazan, Russia. 2019. Vol. 124. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402018> (дата обращения: 13.03.2024). – Text : Electronic.
2. Черняева, Н. Н. Моделирование электропривода подачи стола продольно-фрезерного станка / Н. Н. Черняева, М. А. Макаровский // Информационные технологии моделирования и управления. – 2021. – № 4. – С. 286–292.
3. Андреев, А. Н. Метод и алгоритм обработки сигнала для управления и диагностирования объектов циклического действия металлургического производства / А. Н. Андреев, Д. А. Колесниченко // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2019. – № 2. – С. 9–22.
4. Автоматизированная система диагностирования электромагнитных муфт токарно-карусельного станка / А. Н. Андреев, Д. А. Колесниченко, Т. В. Королев, С. Н. Шейбухов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: технические науки. – 2020. – № 2. – С. 7–9.
5. Mashkin, A. V. Evaluation of the quality of the algorithm for the operation of artificial intelligence systems in solving problems of electric drive diagnostics / Mashkin, A. V., Fedotovskiy, S. B. // Modern informatization problems in simulation and social tech-

nologies : Proceedings of the XXVIII-th International Open Science – Yelm, WA, USA : Science Book Publishing House, 2023. – P. 33–37.

6. Asefi, M. Survey on high-frequency models of PWM electric drives for shaft voltage and bearing current analysis / Asefi, M., Nazarzadeh, J. // IET Electrical Systems in Transporation. – 2017. – Vol. 7, № 3. – P. 179–189.

7. Щербакова, А. А. Инновационная экономика и технологическое предпринимательство / А. А. Щербакова. – Вологда : ВоГУ, 2020. – 88 с.

8. Magdun, O. High-Frequency Induction Machine Modeling for Common Mode Current and Bearing Voltage Calculation / Magdun O., Binder A. // IEEE Transactions on industry applications. – 2014. – Vol. 50, № 3. – P. 1780–1790.

A.V. Mashkin, S.B. Fedotovsky
Vologda State University

MODELING OF VOLTAGE ARISING PROCESS ON ELECTRIC MOTOR BEARINGS FOR ELECTRIC DRIVES WITH HIGH-FREQUENCY PWM

The control of power semiconductor switches by the pulse width modulation (PWM) algorithm in electric drive systems leads to the appearance of common-mode voltage and common-mode current. This can cause voltage induction on their bearings in electric machines of sufficiently high power. This will lead to the flow of current in them and their corrosion, which will eventually cause the failure of the bearings. In order to predict and reduce the number of such failures in an electric machine, it is necessary to take into account the influence of high-frequency pulses on its operating modes when modeling.

Modeling, electric drive, high-frequency components, frequency converters, pulse width modulation.