



СИНТЕЗ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ НА РАБОТУ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Одной из актуальных задач в области автоматизированного электропривода (ЭП) является повышение надежности их работы. Одним из факторов, оказывающих негативное воздействие на надежность системы ЭП, являются высокочастотные помехи, создаваемые управляемыми преобразователями. Они могут привести к генерации синфазного напряжения и тока и в электрических машинах достаточно большой мощности вызвать индукцию напряжения на подшипниках и в конечном итоге их коррозию и выход из строя. Для оценки влияния высокочастотных помех на электрический двигатель необходима разработка его математической модели.

Моделирование, электропривод, высокочастотные составляющие, преобразователи частоты, параметры модели.

Для длинных линий, где длина кабеля l_c превышает некоторую критическую длину l_{cr} , формируемые на фазах двигателя переменного тока преобразователем частоты (ПЧ) напряжения не будут иметь чисто ступенчатую форму, а при переключениях силовых полупроводниковых ключей из-за отражения электромагнитной волны в кабеле будет колебаться около некоторого установившегося значения. Причем пиковое значение формируемого напряжения на фазах двигателя переменного тока может в этом случае кратковременно почти в два раза превышать напряжение на линии постоянного тока. Критическая длина кабеля, при котором в нем возникает отражение электромагнитных волн, может быть определена по следующей формуле:

$$l_{cr} = t_r \cdot v_c / 2,$$

где t_r – время нарастания напряжения на входе кабеля, с;
 v_c – скорость распространения электромагнитной волны вдоль кабеля, м/с.

Если время нарастания напряжения t_r достаточно мало, что имеет место при высокой частоте переключения силовых ключей ПЧ, то даже при короткой длине кабеля напряжение на линии заземления может колебаться. В этом случае будут наблюдаться отклонения измеряемого тока сигнала от вычисленных значений тока, вычисленных по формуле, приведенной в [1]:

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

Как показано в [2, 3], для точного расчета перенапряжения на входных клеммах машины необходимо высокочастотное представление импедансов (полных сопротивлений) машины, которое должно быть достоверным при частоте $f \leq 1/t_r$. Таким образом, при времени нарастания напряжения на входе кабеля, равного $t_r = 100$ нс, необходимо использовать модели высокочастотных устройств с импедансом, который будет корректно представляться по меньшей мере до частоты 10 МГц.

Для моделирования режимов работы электрического двигателя с учетом воздействия на него высокочастотных помех могут использоваться различные схемы замещения фазы АД. Все эти схемы можно использовать для получения частотных характеристик моделируемой системы и вычисления значения синфазного тока. Схема замещения фазы АД, приведенная на рисунке 1а, предложенная в [4], обеспечивает высокую точность моделирования процессов до частоты 1 МГц, но не учитывает возможности возникновения нескольких областей резонанса в системе на частотах свыше 100 кГц. На схеме замещения фазы АД, приведенной на рисунке 1а, используются следующие обозначения: C_g – распределенные паразитные емкости между обмоткой статора и корпусом статора, L_s – индуктивность рассеяния статора, R_e – сопротивление потерям на вихревые токи и R_g – сопротивление корпуса двигателя. Эти параметры и частотные характеристики для ветвей фаза-земля и фаза-нейтраль можно определить экспериментальным путем в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц с помощью стандартного RLC-метра.

На частотах свыше 100 кГц, в зависимости от емкостной связи между витками обмоток, в частотных характеристиках машины может возникнуть несколько областей резонанса. Для учета этих дополнительных областей резонанса, обусловленных эффектом взаимной емкости, в схему замещения параллельно ветви L_s - R_e вводится ветвь R_T - L_T - C_T (рис. 1б) [5]. Однако ввод этой дополнительной ветви, усложняет модель настолько, что для корректировки параметров цепей модели становится необходимым применять метод «проб и ошибок». Достаточно точная модель машины с уменьшенным числом параметров может быть получена при разделении емкости между обмоткой и статором на две составляющие C_{g1} и C_{g2} (рис. 1в) [5]. Эта модель способна адекватно отобразить на частотной характеристике две возникающие резонансные области, одна из которых лежит в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГц, а вторая в диапазоне частот 1–10 МГц. Два паразитных сопротивления R_{g1} и R_{g2} в этой модели последовательно включены с емкостями

C_{g1} и C_{g2} для получения лучшего соответствия измеренных и рассчитанных импедансов СМ (Common Mode) и DM (Differential Mode) режимов. Модель, представленная на рисунке 1в, может быть использована для расчета синфазного тока и перенапряжения на входных клеммах устройства. Однако для расчета напряжения, генерируемого на подшипнике, эта модель нуждается в некоторой модификации. На рисунке 2а приведена схема замещения фазы АД для определения синфазных токов и напряжения на подшипниках. На рисунке 2б представлена схема замещения фазы АД, которая может быть использована для определения его параметров по снятой частотной характеристике.

Схемы фазы замещения АД, приведенные на рисунке 2, представляют из себя модификацию модели, приведенной на рисунке 1в. Модификация этой модели выполнялась исходя из следующих соображений:

1. Две емкости на фазу АД C_{g1} и C_{g2} должны иметь общую точку на корпусе статора, к этой же об-

щей точке подсоединяются конденсатор C_{RS} , служащий для представления емкости между статором и ротором, а также конденсаторы C_{bDE} и C_{bNDE} , которые служат для представления емкостей подшипников, соответственно расположенных на приводной оси (BDE – Bearing Drive End, подшипник на приводной оси) и подшипника АД, расположенного со стороны вентилятора (NBDE – Non BDE, подшипник на не приводной оси). Как следствие в модифицированной модели высокочастотной машины будет использоваться вместо двух сопротивлений R_{g1} и R_{g2} только одно сопротивление R_g . Сопротивление R_g в модели предназначено для учета потерь энергии от вихревых токов в шихтованном ярме статора. Индуктивность L_g шихтованного ярма статора невелика (порядка десятка нГн при частотах 100 кГц и выше) и может быть учтена в модели вместе с индуктивностью разъемов L_c .

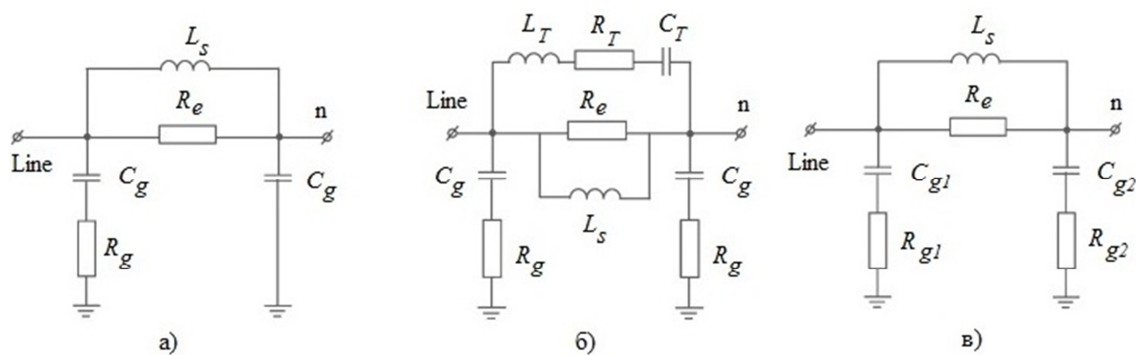


Рис. 1. Схемы замещения фазы АД для учета влияния высокочастотных помех:

а) без учета возможности возникновения нескольких областей резонанса; б) с учетом возможности возникновения нескольких областей резонанса; в) упрощенная модель с учетом возникновения нескольких областей резонанса

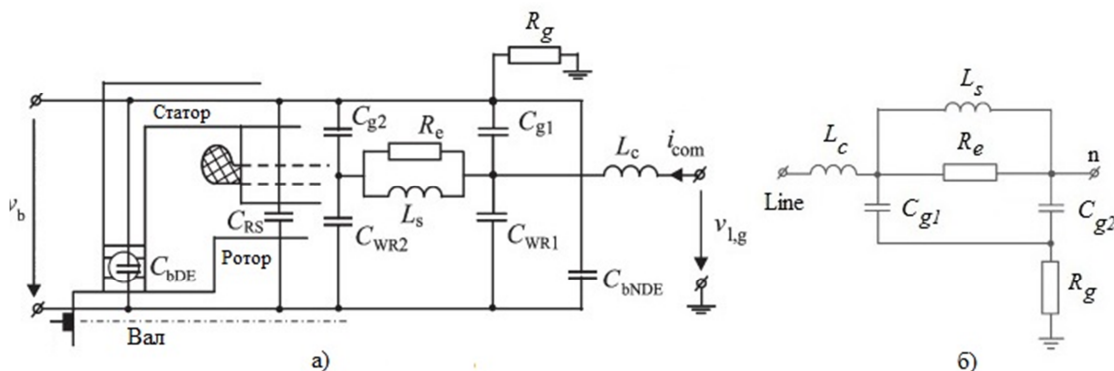


Рис. 2. Схемы эквивалентной цепи и схемы замещения фазы АД:

а) схема эквивалентной цепи; б) схема замещения фазы АД

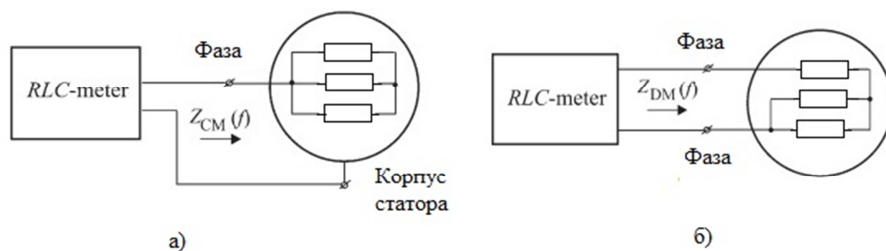


Рис. 3. Схема для снятия импеданса: а) для синфазного режима; б) дифференциального режима

2. Обмотки статора и ротора в модели соединяются конденсатором C_{WR} , который служит для представления емкости между этими обмотками. Емкость C_{WR} оказывает незначительное влияние на ток СМ (СМ – Common Mode, синфазный ток), но она дает возможность варьировать в модели такими параметрами, как величина воздушного зазора и паразитной емкостью подшипников. Схема, приведенная на рисунке 1в, представляет из себя модель одной фазы АД при его питании от источника переменного напряжения с высокой частотой, а сигналом, подаваемым на ее вход, является фазное напряжение, поэтому эквивалентная емкость C_{WR} должна использоваться и в модифицированной модели (рис. 2а). Напряжение между нейтралью и землей, вычисленное для фазы модели, в три раза превышает потенциал нейтральной точки $u_{ng} = u_{com}^* = 3 \cdot u_{com}$. Таким образом, для расчета напряжения на подшипнике в модели, изображенной на рисунке 2а, коэффициент пересчета составляет 1/3, т.е. $BVR^* = BVR/3$. Соответственно определяется и эквивалентная емкость между статорной и роторной обмоткой в модифицированной модели:

$$C_{WR}^* = \frac{C_{WR}/3}{1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{C_{WR}}{C_{RS} + C_{BDE} + C_{NBDE}}}$$

Для асинхронных двигателей основного исполнения можно принять $C_{RS} \approx 20 \cdot C_{WR}$ [6] и эквивалентную емкость между статорной и роторной обмоткой в этом случае можно представить как сумму двух составляющих C_{WR1} и C_{WR2} :

$$C_{WR}^* \cong C_{WR}/3 = C_{WR1} + C_{WR2}$$

Определение высокочастотных параметров модели может быть осуществлено по методике, приведенной в [7]. Согласно этой методике измеряются импедансы для СМ и DM (Differential Mode – дифференциальный режим) на разных частотах (рис. 3) вплоть до максимальной интересующей частоты, например 10 МГц.

На рисунке 4 представлена фазочастотная характеристика и зависимость импеданса от частоты для синфазного режима.

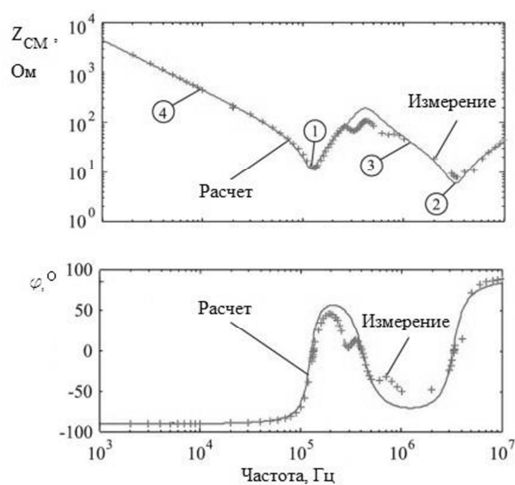


Рис. 4. Фазочастотная характеристика и характеристика $Z_{CM}(f)$ для синфазного режима

СМ-режим работы АД с учетом высокочастотных помех будет в основном определяться паразитной емкостью между обмоткой и корпусом статора $C_{WS} = C_{g1} + C_{g2}$ [8]. Емкость C_{g1} определяет поведение АД на более высоких частотах, превышающих частоту, на которой находится локальный минимум импеданса (точка 1 на рисунке 4). СМ-режим работы АД ниже этой частоты определяется полностью емкостью C_{WS} . Значения емкостей C_{WS} , C_{g1} и C_{g2} могут быть определены по результатам измерения импеданса для нескольких точек кривой $Z_{CM}(f)$ для СМ-режима. Например, в результате измерения были получены значения импеданса в точках 3 и 4 кривой $Z_{CM}(f)$ на частотах f_3 и f_4 , соответственно Z_{CM3} и Z_{CM4} . Тогда значения емкостей C_{WS} , C_{g1} и C_{g2} можно определить по следующим формулам:

$$C_{WS} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_4 \cdot Z_{CM4}}$$

$$C_{g1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_3 \cdot Z_{CM3}}$$

$$C_{g2} = C_{WS} - C_{g1}$$

Помимо определения емкости C_{WS} путем эксперимента, она также может быть рассчитана и по аналитических зависимостям. Однако в этом случае требуется знать геометрические размеры различных частей электрической машины, а эту информацию производители как правило не предоставляют.

Как правило, параметры обмотки статора АД при воздействии на нее высокочастотных помех, представляются в виде 6 параллельных R-L ветвей. Это позволяет учесть потери энергии в стали сердечника статора от вихревых токов и влияние поверхностного эффекта. Для упрощения модели в схемах замещения фазы АД при воздействии на него высокочастотных помех (рис. 1, 2) используется только одна ветвь $R_s - L_s$. Как показывает эксперимент, СМ-ток достаточно точно определяется по данной модели (рис. 2а)). Значение L_s можно определить при помощи снятых частотных характеристик (рис. 4) следующим образом:

$$L_s \cong \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot (C_{g1} + C_{g2})}$$

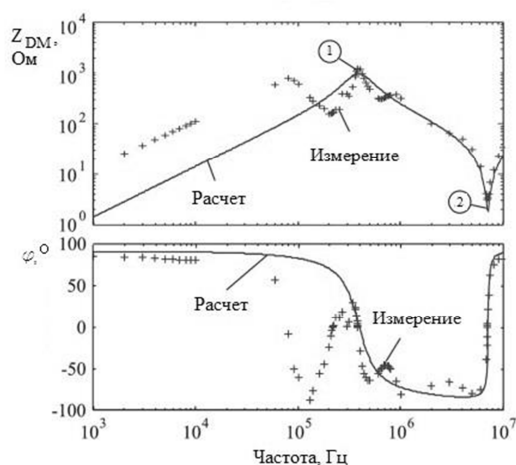


Рис. 5. Фазочастотная характеристика и характеристика $Z_{DM}(f)$ для дифференциального режима

Сопротивление R_e , учитывающее потери энергии от вихревых токов можно определить по частотным характеристика, снятым в системе для ДМ-режима работы (рис. 5):

$$R_e = \frac{2}{3} \cdot Z_{DM1},$$

где Z_{DM1} – максимальное значение импеданса на характеристике $Z_{DM}(f)$, снятой для дифференциального режима работы, Ом.

Для учета дополнительных потерь энергии в системе вводится резистор R_g (рис. 2а). При помощи резистора R_g происходит учет потерь энергии в ярме и корпусе статора АД и других потерь энергии в ветвях, по которым протекает синфазный ток, при его замыкании на землю. Это сопротивление можно рассчитать следующим образом:

$$R_g = 3 \cdot Z_{CM2},$$

где Z_{CM2} – минимальное значение импеданса на характеристике $Z_{CM}(f)$, снятой для синфазного режима работы, Ом.

Таким образом, была создана модель, позволяющая производить расчет синфазного тока при воздействии на АД высокочастотных помех и методика определения параметров, разработанной модели.

Литература

1. Машкин, А. В. Моделирование процесса возникновения напряжения на подшипниках электродвигателя для электроприводов с высокочастотной ШИМ / А. В. Машкин, С. Б. Федотовский // Вестник Вологод-

ского государственного университета. Серия: технические науки. – 2024. – № 1. – С. 52–55.

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

3. Андреев, А. Н. Измерение и первичная обработка сигнала датчика магнитной индукции в рабочей зоне электромеханической системы / А. Н. Андреев, Д. А. Колесниченко, Н. М. Колесниченко // Измерительная техника. – 2018. – № 8. – С. 51–54.

4. Boglietti, A. An accurate induction motor highfrequency model for electromagnetic compatibility analysis / A. Boglietti, E. Carpaneto // Electric Power Components and Systems. – 2001. – Vol. 29, № 3. – P. 191–209.

5. Moreire, A. F. High frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives / A. F. Moreire and others // IEEE Transaction on Industry Applications. – 2002. – Vol. 38, №5. – P. 1297–1305.

6. Muetze, A. Calculation of motor capacitances for prediction of the voltage across the bearings in machines of inverter-based drive systems / A. Muetze, A. Binder // IEEE Transaction on Industry Applications. – 2007. – Vol. 43, № 3. – P. 665–672.

7. Давыдова, Н. В. Электрорезистивный метод измерения параметров комплексного сопротивления / Н. В. Давыдова, Т. И. Ногачева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 4. – С. 92–95.

8. Водовозов, А. М. Оптимизация системы управления насосной станции / А. М. Водовозов, Н. Н. Черняева // Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – № 2. – С. 10–15.

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

SYNTHESIS OF MODEL FOR ASSESSING INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY INTERFERENCE ON ASYNCHRONOUS MOTOR OPERATION

One of the urgent tasks in the field of automated electric drives (ED) is to increase the reliability of their operation. One of the factors that have a negative impact on the reliability of the ED system is high-frequency interference created by controlled converters. They can lead to the generation of common-mode voltage and current and, in electrical machines of sufficiently high power, cause voltage induction on bearings and, ultimately, their corrosion and failure. To assess the impact of high-frequency interference on an electric motor, it is necessary to develop its mathematical model.

Modeling, electric drive, high-frequency components, frequency converters, model parameters.