Методика экспериментального определения влияния электромагнитных возмущений на виброактивность вентильно-индукторных машин

Нгуен Куанг Кхоа - аспирант кафедры
«Электроснабжение и Электропривод»,
Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)
имени М. И. Платова.
E-mail: nguyenkk@mail.ru
Фам Конг Тао - аспирант кафедры
«Электроснабжение и Электропривод»,
Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)
имени М. И. Платова.
E-mail: tao.phamcong@gmail.com
Фам Ван Бьен - аспирант кафедры
«Электроснабжение и Электропривод»,
Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)
имени М. И. Платова.
E-mail: myloveu2006@mail.ru
Научный руководитель – **Темирев А.П.** –
доктор техн. наук, профессор,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова;
директор, ООО «Малое инновационное предприятие
«Мехатроника» ЮРГТУ (НПИ)», г. Новочеркасск.

Nguyen Quang Khoa
department «Electric power supply and electric drive »
Platov South-Russian State Polytechnic University
E-mail: nguyenkk@mail.ru
Pham Cong Tao
department «Electric power supply and electric drive »
Platov South-Russian State Polytechnic University
E-mail: tao.phamcong@gmail.com
Pham Van Bien
department «Electric power supply and electric drive »
Platov South-Russian State Polytechnic University
E-mail: myloveu2006@mail.ru
Temirev Aleksey Petrovich –
research supervisor D. Sc. Tech., Professor,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk
им. М.И. Платова;
Director, LLC "Small innovative company
"Mechatronics" SRSTU (NPI)", Novocherkassk

Аннотация: В данной работе представляется методика экспериментального определения влияния электромагнитных возмущений на виброактивность вентильно-индукторных машин (ВИМ). Рассматривается методика проведения экспериментов и определения влияния электромагнитных возмущений на виброактивность ВИМ на примере двух ВИМ с расчетной мощностью 7,5 кВт и частотой вращения 3000 об/мин, имеющих конфигурацию магнитной системы: Z_s/Z_r = 6/4 и 8/6. Первоначальные опыты проводились при неподвижном положении ротора, соответствующем

согласованному положению зубцов. А потом приведена серия опытов при вращении ротора. На основе полученных результаты представлены рекомендации для улучшения вибрационных характеристик ВИМ.

Ключевые слова: вибрация электромашины, вентильно-индукторный двигатель, уровень вибрации ВИД, виброактивность,

Abstract: This paper presents a method of experimental determination of the influence of electromagnetic disturbances on vibroactivity of the switched reluctance machines (SRM). It presents the technique of carrying out experiments and to determine the influence of electromagnetic disturbances on vibroactivity SRM by two example, with estimated power of 7.5 kW and a speed of 3000 rev/min, with the configuration of the magnetic system: Zs / Zr = 6/4 and 8/6. Initial experiments were carried out with a fixed position of the rotor, corresponding to the agreed position of the teeth. After that shows a series of experiments with the rotation of the rotor. On basic of the results presented recommendations for improving the vibration characteristics of the SRM.

Keywords: vibration machines, vibration SRM, electric motor noise, noise level, vibration and noise

Введение

Виброакустические характеристики являются одним из важных потребительских свойств любого электромеханического преобразователя. Однако известно, что для вентильно-индукторного электропривода (ВИП), который выполняется на базе индукторной машины с двойной зубчатостью магнитной системы, вызывающей шум и пульсации момента [1]. В рабочем режиме уровень вибрации зависит от многих факторов, такие как форма тока, подаваемого в обмотки, частота вращения, качество подшипниковых узлов, воздушный зазор между ним. Вибрация совсем принесет вредность электроприводу, создает виброшумов, снижает ресурс всех узлов ВИМ и особенно подшипниковые узлы, поэтому проблема уменьшения шумов и вибраций особенно актуальна.

Однако в технической литературе недостаточно освещены вопросы по нахождению причин, вызывающих в ВИМ вибрации и решения для уменьшения ее уровня, особенно отсутствует экспериментальное исследование влияния электромагнитных возмущений на вибрацию ВИМ.

В [2] описан способ снижения шума и вибрации вентильно- индукторного двигателя, заключающийся в том, что к обмотке двигателя с помощью преобразователя частоты прикладывают один или несколько импульсов напряжения, включая два ключа Т1 и Т2 (рис.1), в конце зоны подачи напряжения выключают указанные ключи и с помощью диодов прикладывают к обмотке напряжение обратной полярности, отличающийся тем, что после выключения ключей замедляют уменьшение тока, включая и выключая один из указанных ключей. На рис. 2 показаны форма фазного тока и напряжения и соответствующие сигналы управления ключами, при это фиг. 2а - сигнал управления ключа Т1; фиг. 2б - сигнал управления ключа Т2; фиг. 2в - напряжение, приложенное к обмотке двигателя; фиг. 2г - ток фазы двигателя.

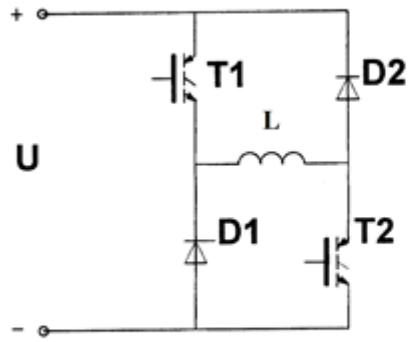


Рис. 1 схема полумоста одной фазы ВИМ

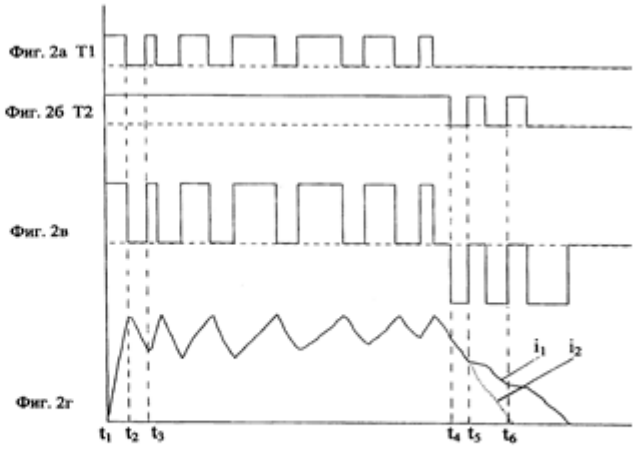


Рис. 2. Форма фазного тока и напряжения и соответствующие сигналы управления ключами

Согласно результатам, описанным в [2] форма фазного тока влияет на уровень шума и вибрации ВИМ, можно уменьшать уровень шума и вибрации путем управления коммутацией ключей.

В данной работе рассматривается методика проведения экспериментов и определения влияния электромагнитных возмущений на виброактивность ВИМ в разных ситуациях на примере двух ВИМ с расчетной мощностью 7,5 кВт и частотой вращения 3000 об/мин, имеющих конфигурацию магнитной системы: Z_S/Z_r = 6/4 и 8/6. Первоначальные опыты проводились при неподвижном положении ротора, соответствующем согласованному положению зубцов. А потом приведена серия опытов при вращении ротора.

1.Схема и методика проведения экспериментов с неподвижным ротором

Оценка влияния электромагнитных возмущений на виброактивность ВИМ проводилась на примере двух машин с расчетной мощностью 7,5 кВт и частотой вращения 3000 об/мин, выполненных в стандартном конструктиве асинхронного двигателя общепромышленного исполнения с высотой вала 132 мм и имеющих различные конфигурации магнитной системы: Z_S/Z_r = 6/4 и Z_S/Z_r = 8/6. Первоначальные опыты проводились при неподвижном положении ротора, соответствующем согласованному положению зубцов ротора и возбуждаемой фазы статора – максимальному значению проводимости магнитной цепи и, следовательно, максимальному значению индуктивности фазы. На рис. 3 приведена схема проведения экспериментов по возбуждению и регистрации импульсов тока и виброускорения.

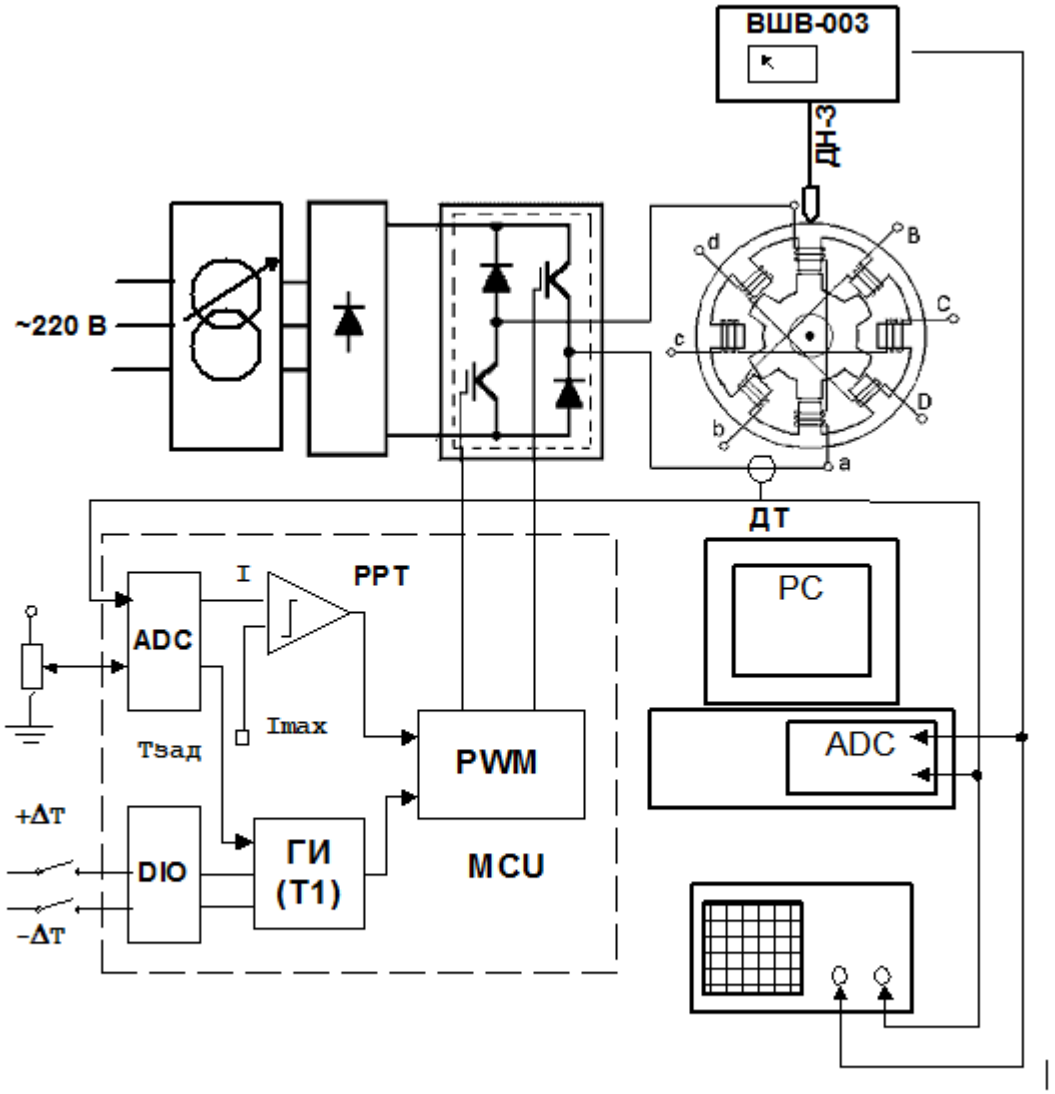


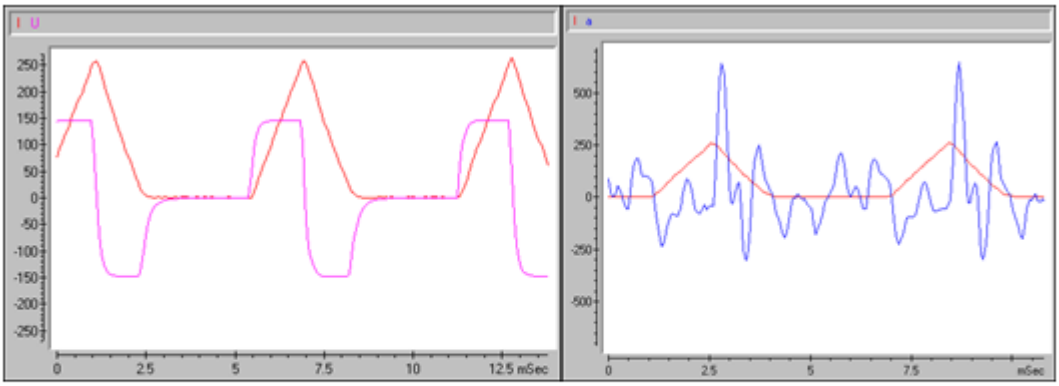
Рис. 3. Схема проведения экспериментов по возбуждению и регистрации импульсов тока и виброускорения

Для возбуждения акустических колебаний использовалась одна фаза двигателя, подключенная к соответствующим выводам статического коммутатора – преобразователя электроэнергии. Управление силовыми ключами фазы преобразователя и формирование прямоугольных импульсов напряжения с плавно изменяющейся частотой следования осуществлялось с помощью разработанной специальной программы регулируемого генератора частоты ГИ, загружаемой в оперативную память микропроцессорной системы управления силовым преобразователем [3]. Для изменения частоты использовались два канала управления: для грубого задания – сигнал $T_{зад}$ с движка потенциометра, подаваемый на один из аналоговых входов ADC микроконтроллера, для точной подстройки частоты – сигналы +DT и –DT с двух кнопок управления, подаваемые на два дискретных входа микроконтроллера DIO. Для ограничения тока фазы при низких частотах повторения и большой длительности импульсов прикладываемого к фазе напряжения, а также для защиты силовых ключей в программном обеспечении регулируемого генератора частоты предусмотрен релейный регулятор тока PPT. Уставка токоограничения I_{max} задается программно в виде константы, а сигнал обратной связи по току I поступает на аналоговый вход микроконтроллера с датчика тока ДТ, включенного в силовую цепь возбуждаемой фазы ВИМ. Силовой преобразователь получает питание от регулируемого источника постоянного напряжения, реализованного с помощью трехфазного автотрансформатора и мостового выпрямителя. Амплитуда прикладываемых к фазе импульсов напряжения регулируется изменением напряжения

источника питания.

На рис. 4 в качестве примера результатов приведены осциллограммы тока и напряжения фазы (а) и тока фазы и виброускорения (б). Сигнал виброускорения регистрировался с аналогового выхода измерителя шума и вибрации ВШВ-003, ко входу которого был подключен датчик виброускорения ДН-3, установленный на корпусе ВИМ в месте наибольшей виброактивности – над возбуждаемой фазой. Измерялась радиальная составляющая виброускорения. В дополнение к осциллограммам виброускорения регистрировались показания стрелочного прибора ВШВ-003, измеряющего среднее квадратическое значение виброускорения. Величины на осциллограммах приведены в процентах. Масштаб по оси ординат для тока – 100% соответствует 1 А, для виброускорения – 2 В на аналоговом выходе ВШВ-003 на пределе измерения 3 м/с^2.

Длительность импульса положительного напряжения составляет 25% от периода повторения импульсов (рис. 4,а). Длительность импульса отрицательного напряжения также близка к 25%, поскольку при неподвижном роторе отсутствует ЭДС вращения и графики изменения потока и тока имеют форму равнобедренного треугольника. Выбранное соотношение между длительностью импульсов и периодом их повторения обеспечивает 50%-ную паузу между соседними импульсами, что облегчает анализ формы сигнала виброускорения и определение моментов возбуждения колебаний. Выбранное соотношение поддерживалось постоянным при изменении частоты, хотя изменениями в программе микроконтроллера можно обеспечить и другие режимы генерации импульсов, например, сохранение неизменной длительности короткого импульса при изменении частоты.



а б

Рис. 4. Пример осциллограмм тока и напряжения фазы (а) и тока фазы и вибро ускорения (б) при $T_{ком}$ = 0,63 мс, (по прибору, а = 6,2 м/с^2)

Обратим внимание на то, что наибольший всплеск виброускорения на рис. 4,б возникает в момент изменения производной тока при его максимальном значении, т.е. при скачкообразном переключении знака подводимого к обмотке напряжения. Отметим также, что приведенные на рис. 4,б и далее осциллограммы виброускорения не носят случайный характер, т.е. не являются отдельной реализацией случайных процессов, наблюдаемых обычно при исследовании виброактивности в режимах вращения электрических машин. Эти осциллограммы являются строго периодическими функциями с периодом, равным периоду повторения возбуждающих импульсов, и их форма стабильно воспроизводится на экране осциллографа.

1. Исследование ВИМ с конфигурацией 6/4 при неподвижном роторе

На рис. 5 представлены зависимости среднего квадратического значения виброускорения а от частоты возбуждающих импульсов f [4]. Оба графика получены при напряжении питания $U_п$ = 150 В.

Начнем рассмотрение с графика а(f) для ВИМ с конфигурацией 6/4. Наибольшие значения

виброускорения (в диапазоне 6…8 м/с^2) наблюдаются при частотах 3225 Гц, 1587 Гц, 1235 Гц, 617 Гц и 408 Гц. В минимумах между ними значения a(f) снижаются до уровня 1…2 м/с^2. Характерная для максимумов виброускорения осциллограмма приведена на рис. 6, из которого видно, что график a(t) по форме близок к синусоидальному с частотой примерно в два раза большей частоты возмущающих импульсов, что составляет 3174 Гц и близко к частоте следующего максимума 3225 Гц на рис. 5. О том, что частоты не точно кратны двум, свидетельствует некоторое постепенное изменение значений минимумов и максимумов, сходное с эффектом биений амплитуды колебаний при наложении друг на друга двух близких частот. Однако это не биения в чистом виде, поскольку минимальный размах амплитуд не достигает нулевого значения. Следовательно, в данном случае механизм взаимодействия собственных колебаний с возмущающими электромагнитными воздействиями более сложный и требует дополнительных исследований.

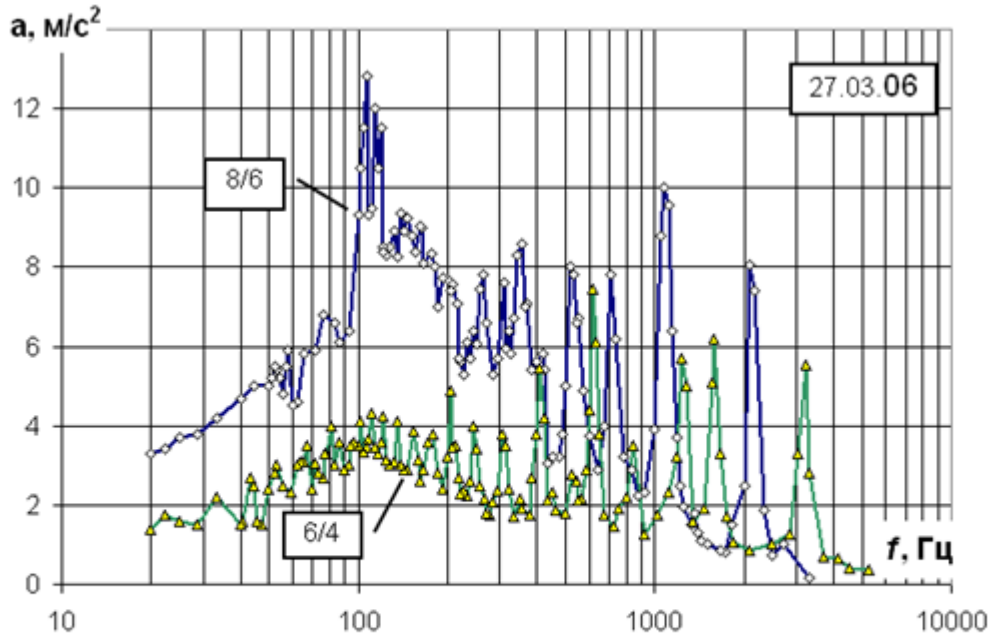


Рис. 5. Зависимость виброускорения, *a* от частоты возмущающих импульсов тока *f* для двух ВИМ с высотой оси 132 мм – с конфигурацией 6/4 и 8/6

На рис. 7 приведена осциллограмма при частоте возмущающих воздействий f = 562 Гц, что в 2,8 меньше, чем в предыдущем случае. При этом среднее квадратическое значение виброускорения a снижается более чем в три раза, а амплитудные значения – примерно в два раза. Максимальные положительные и отрицательные значения амплитуды наблюдаются сразу после максимума тока, а период возбуждаемых колебаний составляет около 0,33 мс, что близко к периоду колебаний на предыдущей осциллограмме и примерно соответствует частоте 3225 Гц зарегистрированного наиболее высокочастотного максимума виброускорения на рис. 5. В период следования возмущающих импульсов $T_{ком}$ = 1,78 мс укладывается около 5,5 периода высокочастотных колебаний. Следовательно, новый возмущающий импульс поступает примерно в противофазе с высокочастотными колебаниями от предыдущего импульса, что может быть причиной снижения уровня виброускорения.

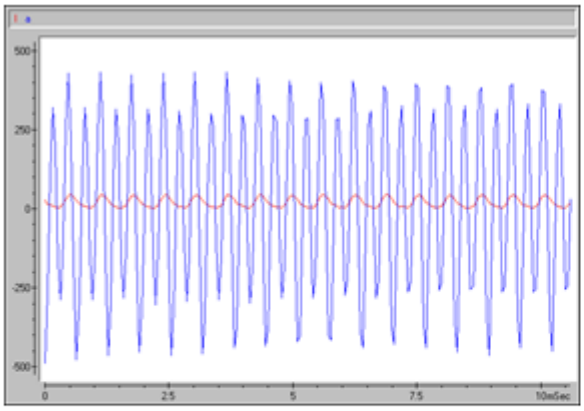


Рис. 6. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 1587$ Гц ($T_{ком} = 0{,}63$ мс), по прибору, $a = 6{,}2$ м/с^2

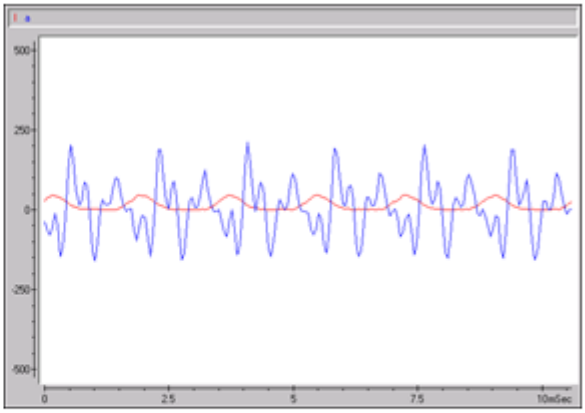


Рис. 7. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 562$ Гц ($T_{ком} = 1{,}78$ мс), по прибору, $a = 1{,}9$ м/с^2

Осциллограмма на рис. 8 при частоте возмущающих воздействий f = 247 Гц показывает, как возрастает значение виброускорения и изменяется его спектральный состав при относительно небольшом изменении частоты возмущений. В момент изменения производной тока при его максимуме можно выявить более высокочастотные колебания, которые проявляются в появлении локальных экстремумов, близких по времени к абсолютным экстремумам. Увеличение уровня колебаний можно объяснить тем, что момент изменения производной тока и связанное с этим возмущение совпадают по фазе с колебаниями, вызванными предыдущим возмущением.

Осциллограмма на рис. 9 при частоте возмущающих воздействий f = 123 Гц аналогична предыдущему случаю, но за счет увеличения вдвое периода возмущений на ней более наглядно проявляется наличие в виброускорении двух частот. Более высокочастотные колебания затухают к половине периода возмущений, далее форма колебаний приближается к гармонической, но с меньшей частотой (около 1250 Гц). Момент изменения производной тока по-прежнему приходится на отрицательную амплитуду колебаний от предыдущего импульса, что усиливает колебания.

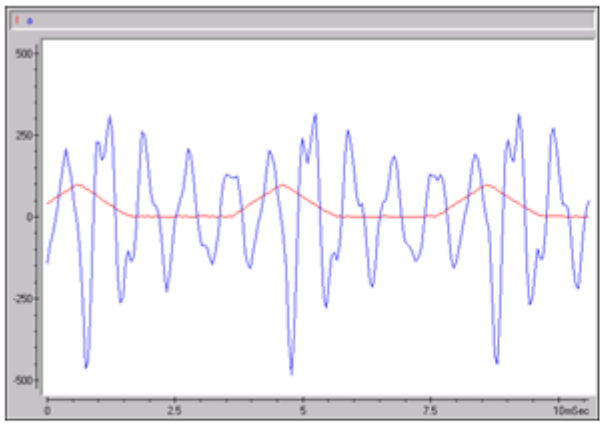


Рис.8. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 247$ Гц ($T_{ком} = 4{,}05$ мс), по прибору, $a = 3{,}6$ м/с^2

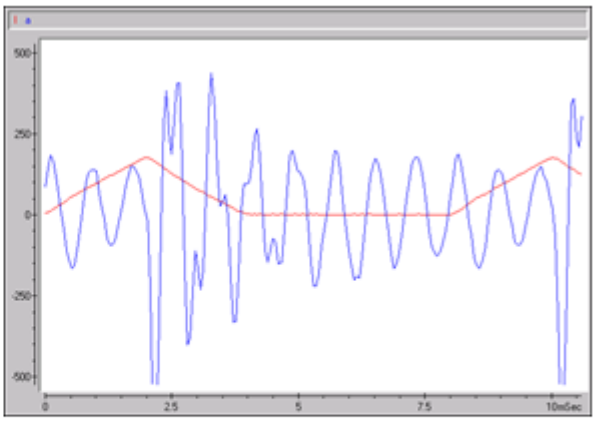


Рис.9. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 123$ Гц ($T_{ком} = 8{,}1$ мс), по прибору, $a = 4{,}0$ м/с^2

Дальнейшее уменьшение частоты возмущающих импульсов до 65 Гц (рис. 10) приводит к росту амплитуды импульсов тока и, следовательно, к росту амплитуд вибраций. Однако характер колебаний по сравнению с предыдущим случаем не изменяется. Хотя значения экстремумов виброускорения в момент возмущения колебаний возрастают примерно в полтора раза, среднее

квадратическое значение виброускорения почти не изменяется, поскольку к следующему импульсу тока колебания виброускорения существенно затухают.

Осциллограмма на рис. 11 демонстрирует действие релейного регулятора тока, ограничивающего ток на уровне 4,5 А. Хотя в осциллограмме на участке токоограничения значительных изменений тока не наблюдается, в сигнале виброускорения присутствуют высокочастотные колебания значительной амплитуды, имеющие случайный характер, поскольку огибающая амплитуд не остается постоянной или не изменяется монотонно. Следует заметить, что частота переключений регулятора тока была достаточно высокой, специально ничем не ограничивалась и не задавалась, а определялась фактически задержками в канале АЦП микроконтроллера и временем цикла выполнения программы в микроконтроллере. Интервал времени между соседними замерами при регистрации сигналов в компьютере составлял 54 мкс, что не позволяло обнаружить частоты выше 10 кГц. Кроме того, наличие фильтра на входе канале АЦП компьютера не сглаживало высокочастотные колебания в сигнале тока.

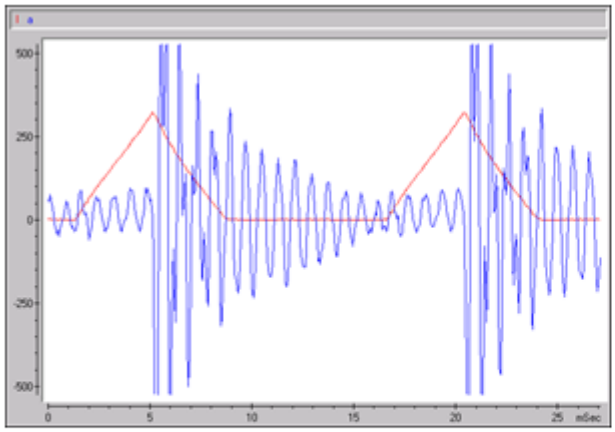


Рис.10. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 65$ Гц ($T_{ком} = 15{,}4$ мс), (по прибору, $a = 4{,}2$ м/с^2)

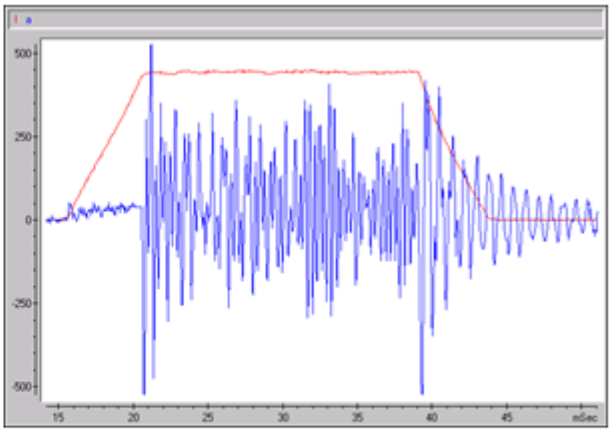


Рис. 11. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 10{,}5$ Гц ($T_{ком} = 95$ мс), (по прибору, $a = 1{,}6$ м/с^2)

В момент начала отключения фазы резкое изменение производной тока вызывает, как и прежде, возмущение в колебаниях, но их характер изменяется и становится сходным с предыдущими осциллограммами. Среднее квадратическое значение виброускорения составляет всего 1,6 м/с^2, поскольку на значительном по длительности интервале паузы колебания виброускорения успевают практически затухнуть (см. начало осциллограммы).

Подводя предварительные итоги рассмотрения осциллограмм виброускорения для ВИМ с конфигурацией 6/4, можно утверждать следующее. Высокочастотные колебания с частотой около 3200 Гц присутствуют в большинстве осциллограмм сразу после возмущающего воздействия – скачкообразного изменения производной тока в районе его максимального значения. Эти колебания затухают на интервале около 3 мс, если период возмущений существенно превышает этот интервал. При периоде возмущений меньше 3 мс форма сигнала виброускорения и его среднее квадратическое значение зависят от фазы колебаний, вызванных предшествующим импульсом тока, к моменту максимума последующего импульса успевают полностью затухнуть.

Вторая частота, присутствующая в сигнале виброускорения, имеет значение около 1250 Гц. Она проявляется при частотах возмущений, меньших 600 Гц, но наиболее заметна к концу периода возмущений при частотах меньших 300 Гц.

Работа релейного регулятора тока вызывает в сигнале виброускорения возникновение незатухающих высокочастотных колебаний даже при отсутствии видимых колебаний в сигнале тока.

3. Исследование ВИМ с конфигурацией 8/6 при неподвижном роторе

Перейдем к анализу графика a(f) для ВИМ с конфигурацией 8/6 (рис. 5). Для этой машины наибольшие значения виброускорения зарегистрированы в области высоких частот при частотах возмущений 2080 Гц и 1075 Гц. Их отношение близко к двум, поэтому можно предположить, что форма вибраций на них одинакова и близка к гармонической с постоянной частотой. Частоты 520, 417, 347, 298 и 260 Гц также являются субгармониками частоты 2083,3 Гц и максимумы на этих или близких частотах могут быть связаны с колебаниями на основной частоте. Дальнейшее повышение уровня вибраций в диапазоне 100…200 Гц и особенно несколько близких максимумов в диапазоне 100…120 Гц трудно напрямую связать с высокочастотными колебаниями. Спектральный состав осциллограмм в этом диапазоне требует специального детального рассмотрения. На последующих рисунках приведены осциллограммы тока и виброускорения для ВИМ с конфигурацией 8/6, аналогичные полученным ранее для ВИМ конфигурации 6/4. Следует заметить, что они были получены не одновременно с графиком a(f) рис. 5, условия их регистрации отличаются от условий получения этого графика, уровень виброускорения в целом для этих осциллограмм ниже, чем на графике. Поэтому их следует рассматривать только на качественном уровне, как иллюстрации изменения формы виброускорения при постепенном уменьшении частоты возмущающих импульсов тока.

Осциллограмма на рис. 12 показывает случай, когда частота возмущений 544 Гц близка к второй субгармонике частоты 1075 Гц или четвертой субгармонике частоты 2080 Гц. Сразу после максимума тока эти субгармоники накладываются друг на друга, а на второй половине периода возмущений преобладает частота 1075 Гц.

При частоте возмущений f = 109 Гц (рис. 13) в колебаниях доминирует высокая частота (около 2,4 кГц), но можно проследить и наличие низкой частоты, близкой к новой частоте возмущений.

Сопоставляя осциллограммы, полученные для ВИМ конфигурации 8/6, с результатами, рассмотренными ранее для ВИМ конфигурации 6/4, можно утверждать следующее. ВИМ 8/6 имеет более разнообразные формы колебаний и их спектральный состав, но в явном виде выделяются только две или три частоты: около 2,4 кГц, 2 кГц и 1 кГц. Наложение этих возбуждаемых частот друг на друга маскирует наличие более низких частот, не позволяя получить режим стабильных гармонических колебаний на этих низких частотах. Чтобы ликвидировать присутствие высокочастотных колебаний при низких частотах возмущающих воздействий, необходимо изменить форму импульсов тока, ликвидировав резкие изменения производной тока и приблизив форму импульсов к гармонической.

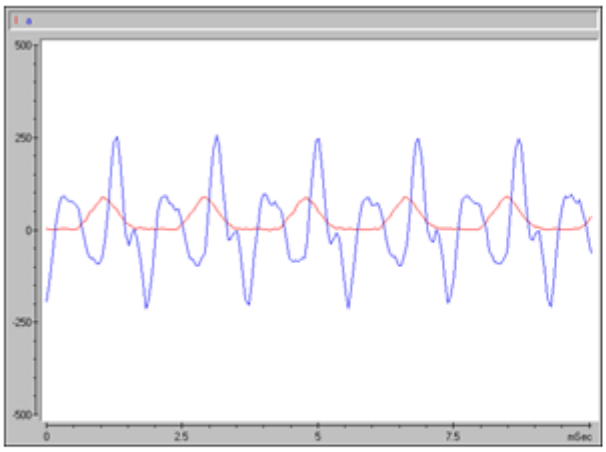


Рис. 12. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 544$ Гц ($T_{ком} = 1{,}84$ мс), по прибору, $a = 0{,}77$ м/с^2

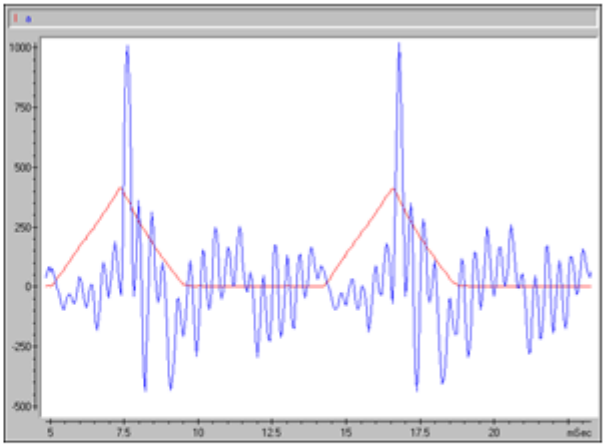


Рис. 13. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 109$ Гц ($T_{ком} = 9{,}2$ мс), по прибору, $a = 1{,}3$ м/с^2

Осциллограмма на рис. 14 демонстрирует работу токоограничения с помощью релейного регулятора тока. В отличие от ВИМ 6/4 (рис. 11) в данном случае на достаточно стабильные высокочастотные колебания накладываются колебания низкой частоты 300…400 Гц.

Все приведенные выше осциллограммы для ВИМ 8/6 были получены при возбуждении фазы А, зубцы которой расположены вертикально, причем при неизменном положении ротора.

Осциллограмма на рис. 15 демонстрирует изменение формы колебаний при уменьшении напряжения питания до 95 В. Кроме затягивания фронтов нарастания и спадания тока, приводящих к уменьшению амплитуд всплесков виброускорения в моменты начала и окончания работы токоограничения, наблюдается снижение уровня колебаний на интервале токоограничения. Это может быть связано с более плавным изменением тока при пониженном напряжении питания за счет повышения или понижения частоты переключений релейного регулятора тока.

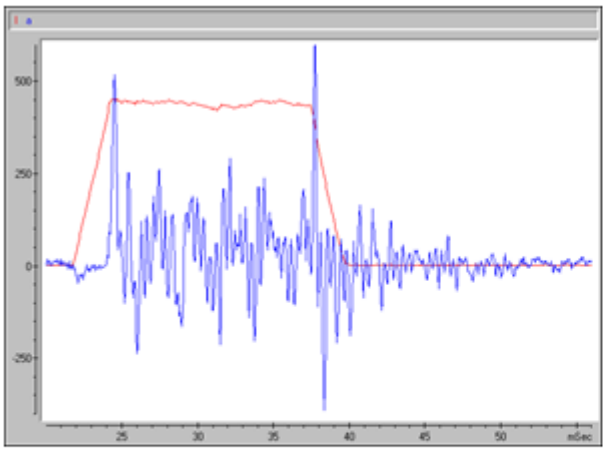


Рис. 14. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при $f = 62$ Гц ($T_{ком} = 62$ мс), по прибору, $a = 0{,}43$ м/с^2

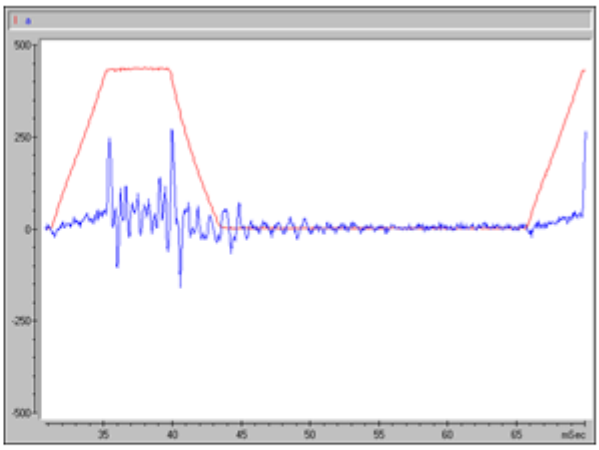
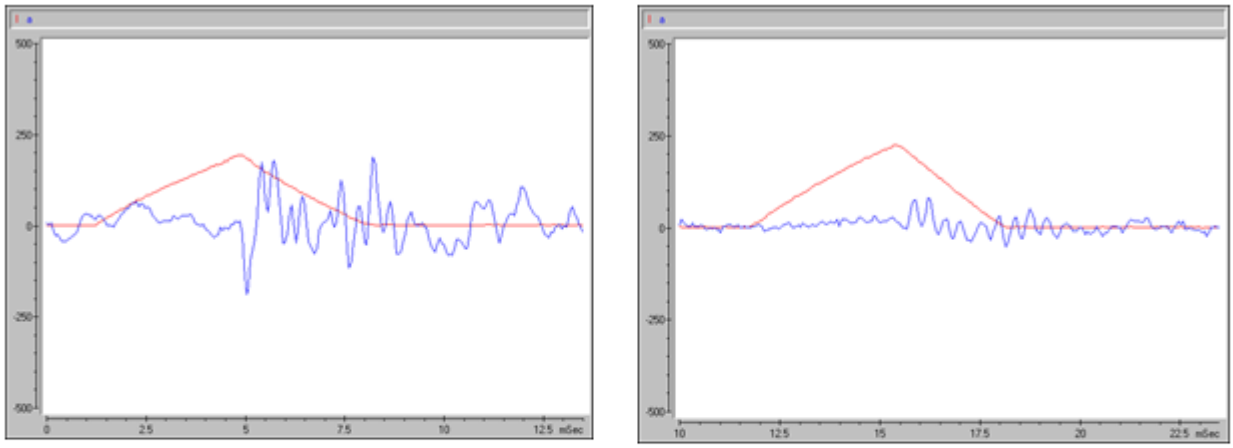


Рис. 15 Осциллограмма тока фазы и виброускорения при работе регулятора тока $U = 95$ В

Осциллограмма на рис.15 показывает, что в рассогласованном положении зубцов статора и ротора вибрации практически отсутствуют. Причина отсутствия вибрации в том, что при одном и том же уровне тока значения магнитного потока и электромагнитных сил в рассогласованном положении зубцов значительно меньше, чем в согласованном положении.

Осциллограммы на рис.16 показывают изменение вибраций при повороте ротора на 180°. Рис.

16,а соответствует исходному положению ротора, при котором получены все предыдущие осциллограммы. В этом положении наблюдался значительный уровень шума. При повороте ротора на 180° шум существенно снижался, хотя магнитный поток проходил через те же зубцы статора и ротора.



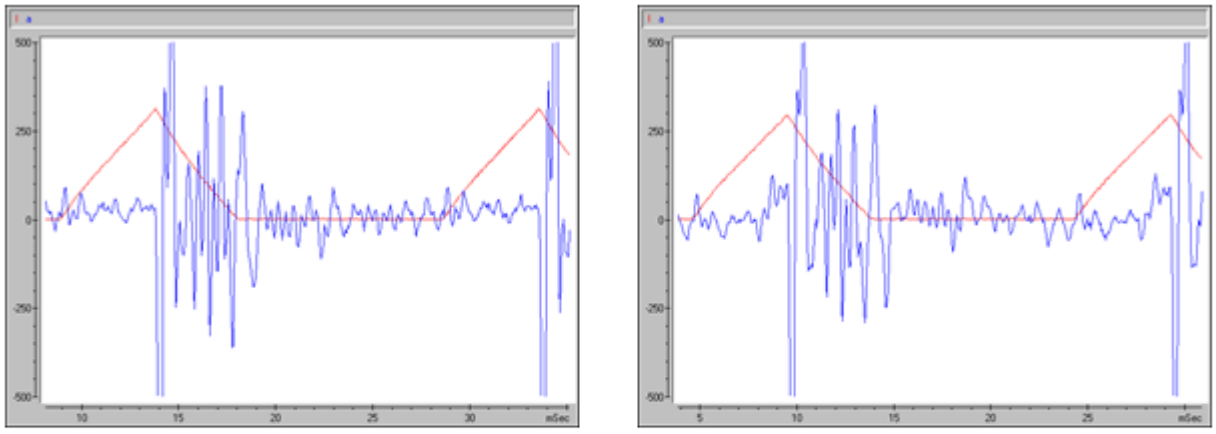
а) б)

Рис. 16 Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы с вертикально расположенными зубцами и двух диаметрально противоположных согласованных положениях ротора

Можно предположить, что причиной наблюдаемых изменений являются два фактора. Во-первых, это наличие зазоров в подшипниковых узлах, позволяющих перемещаться ротору в радиальном направлении. Косвенным подтверждением этому является то, что приложение радиального усилия к выходному концу вала изменяло уровень и тон шума. Во-вторых, это неравномерность воздушного зазора, обусловленная эксцентриситетом ротора или погрешностями в изготовлении зубцов, что экспериментально подтверждено замерами максимальных индуктивностей катушек фаз при различных согласованных положениях ротора. Неравенство воздушного зазора между верхней и нижней парами зубцов приводит к тому, что при одинаковом токе в катушках фазы (при их последовательном соединении) радиальные усилия этих зубцовых пар будут различны.

Для случая а) усилие верхней зубцовой пары больше и результирующее усилие направлено вверх. Если оно становится больше силы тяжести ротора, то ротор перемещается вверх за счет раскрытия зазоров в подшипниковом узле. Для случая б) результирующее электромагнитное усилие действует вниз, совместно с силой тяжести, что не вызывает раскрытия зазоров и усиления шума и вибраций.

Для проверки сделанных предположений были получены осциллограммы при питании фазы С, зубцы которой расположены в горизонтальной плоскости. Сравнение осциллограмм а) и б) рис. 17 показывает, что в этом случае поворот ротора на 180° не изменяет уровня вибрации. Следует заметить, что уровень вибрации существенно больше, чем на рис. 16, поскольку для раскрытия зазоров в горизонтальной плоскости не нужно преодолевать силу тяжести, действующую на ротор. Осциллограмма рис.18 отличается от рис. 17 тем, что к концу вала ротора было приложено внешнее усилие в горизонтальной плоскости. Оно смещало ротор в среднее положение относительно имеющихся зазоров, что еще больше увеличило уровень вибраций и привело к появлению низкочастотной составляющей вибраций.



а) б)

Рис.17 Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы с горизонтально расположенными зубцами и двух диаметрально противоположных согласованных положениях ротора

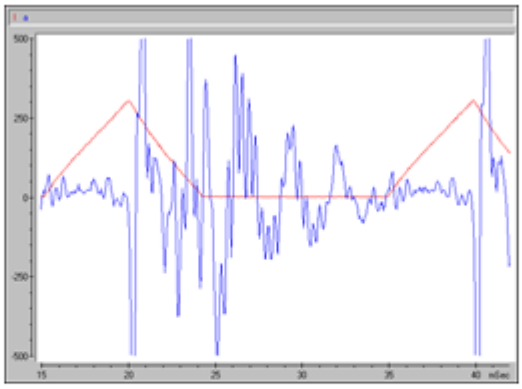
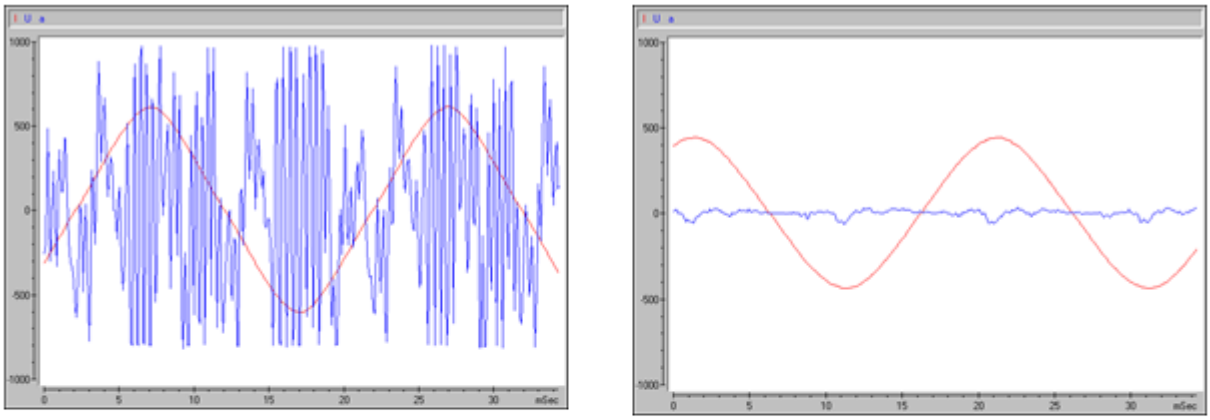


Рис. 18. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы с горизонтально расположенными зубцами и приложением к валу внешней силы (раскрытие зазоров)

Осциллограммы рис. 19 аналогичны по условиям получения осциллограммам рис. 17, но получены при питании фазы непосредственно от вторичной обмотки автотрансформатора, т.е. от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц. Осциллограмма а) демонстрирует, что раскрытие зазоров может вызывать сильные вибрации даже при отсутствии резких изменений в форме тока. Но если результирующая электромагнитная сила совпадает по направлению с силой тяжести, как на осциллограмме б), то при тех же возмущающих воздействиях вибрации практически отсутствуют.



а) б)

Рис. 19. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы с горизонтально расположенными зубцами и двух диаметрально противоположных согласованных положениях ротора синусоидальным напряжением частотой 50 Гц

4. Исследование ВИМ с конфигурацией 6/4 при вращении ротора от внешнего двигателя

Все рассмотренные выше опыты были проведены для неподвижного ротора в согласованном положении зубцов фазы статора и ротора. В этом положении электромагнитные силы действуют в радиальном направлении и не развивают вращательного момента. В рабочем режиме такая ситуация имеет место только однажды за цикл коммутации фазы, а основной интервал работы фазы протекает на участке с изменяющейся в функции положения ротора индуктивностью фазы. При этом постоянно изменяется соотношение между радиальной и тангенциальной составляющими электромагнитных сил. Для детального исследования влияния положения ротора на виброактивность электромагнитных сил необходимо привести несколько серий опытов, аналогичных рассмотренным выше, но при различных фиксированных положениях ротора. Для этого требуется механическое приспособление, позволяющее достаточно жестко фиксировать ротор в заданном положении и препятствовать действию развиваемого фазой механического момента. Следует заметить, что жесткость элементов механической фиксации вала может существенно влиять на частоту собственных крутильных колебаний ВИМ.

Предварительная оценка влияния положения ротора на виброактивность электромагнитных сил может быть получена при принудительном вращении вала ВИМ от внешнего двигателя. В данном случае в качестве такого двигателя использовалась сочлененная с валом ВИМ машина постоянного тока, которая в рабочих режимах использовалась как нагрузочное устройство.

На рис. 20 приведена осциллограмма при возбуждении фазы частотой 960 Гц и вращении ротора с n = 333 об/мин. Из общего вида (рис. 20) следует, что амплитуда импульсов тока модулируется функцией обратной величины индуктивности фазы. В рассогласованном положении зубцов имеем максимальные значения амплитуда импульсов тока, а по мере увеличения степени перекрытия зубцов растет значение индуктивности и амплитуды импульсов тока уменьшаются. В форме сигнала виброускорения наблюдается более сложная картина. Минимальный уровень вибраций соответствует интервалу с максимальными импульсами тока, что вполне объяснимо, поскольку это интервал с минимальной индуктивностью фазы и ее незначительным изменением в функции поворота ротора. Следовательно, на этом интервале не возникает значительных электромагнитных сил. Затем начинается постепенное уменьшение амплитуды импульсов тока, что

сопровождается сначала нарастанием, а затем некоторым уменьшением амплитуды вибраций. Первоначальное усиление вибраций связано с началом перекрытия зубцов, при котором появляются как радиальные, так и тангенциальные составляющие электромагнитных сил. Затем увеличение значения индуктивности приводит к уменьшению амплитуды импульсов тока, следовательно, и электромагнитных сил. К концу периода изменения сигналов, соответствующего полюсному делению ротора, уменьшается площадь перекрытия зубцов, индуктивность начинает уменьшаться, что вызывает нарастание амплитуд в сигнале виброускорения. Обратим внимание на то, что на этом интервале уровень вибраций превосходит их уровень на начальном этапе перекрытия зубцов. Этому могут способствовать два фактора. Во-первых, это участок генераторного режима работы ВИМ, где ЭДС вращения, увеличивающаяся по мере роста тока, направлена согласно с прикладываемым к фазе внешним напряжением, что способствует более резкому нарастанию тока и, следовательно, большему скачку производной тока в момент отключения фазы. Во-вторых, возможно усиление вибраций за счет резонансных явлений, связанных с совпадением фазы колебаний с фазой возмущающих импульсов.

В увеличенном масштабе фрагменты осциллограммы, соответствующие началу и окончанию перекрытия зубцов, показывают что основная возбуждаемая частота примерно в три раза больше частоты возмущений, т.е. около 3 кГц, что близко к полученному ранее самому высокочастотному максимуму для ВИМ 6/4 (рис. 5).

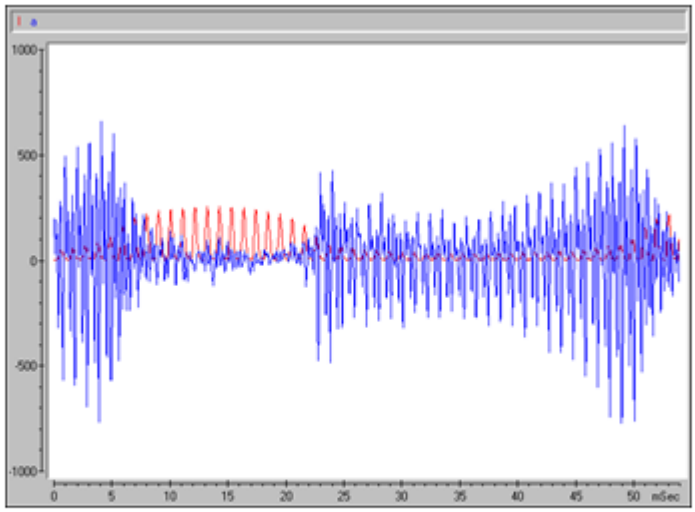


Рис. 20. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы частотой 960 Гц и вращении ротора с $n = 333$ об/мин

Уменьшение примерно вдвое частоты вращения ротора при неизменной частоте возмущающих импульсов (рис. 21) не изменяет характера протекания описанных ранее процессов и частоту возбуждаемых колебаний.

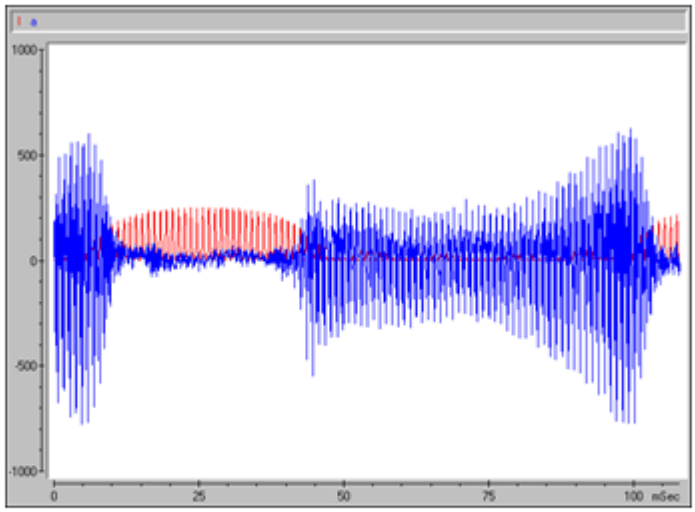


Рис. 21 Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы частотой 960 Гц и вращении ротора с $n = 158$ об/мин

Увеличение частоты следования импульсов тока до 2,4 кГц (рис. 22) с одной стороны уменьшает амплитуды импульсов тока, а с другой – изменяет характер возбуждаемых колебаний. В данном случае частота колебаний совпадает с частотой возмущений. Увеличение частоты вращения ротора до 517 об/мин при неизменной частоте возмущающих импульсов 2,4 кГц (рис. 23) фактически сохраняет характер процессов предыдущего опыта. Уменьшается только амплитуда импульсов тока, а амплитуды вибрации становятся менее стабильными.

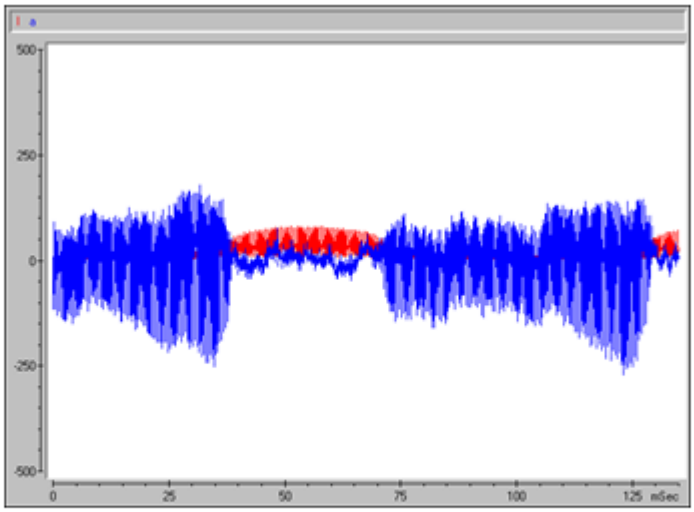


Рис. 22 Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы частотой 2380 Гц и вращении ротора с $n = 167$ об/мин

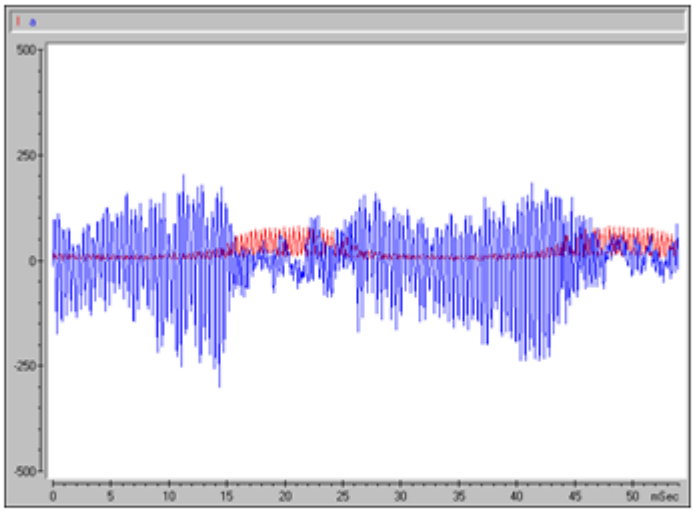


Рис. 23. Осциллограмма тока фазы и виброускорения при возбуждении фазы частотой 2380 Гц и вращении ротора с $n = 517$ об/мин

Вывод

Плавное изменение периода повторения прямоугольных импульсов напряжения при питании ими фазы ВИМ в согласованном положении зубцов позволяет выявить основные частоты колебаний ВИМ под действием радиальных электромагнитных сил. Для исследованного экземпляра ВИМ 6/4 эти частоты равны 3,2 кГц, 1,25 кГц. Для исследованного экземпляра ВИМ 8/6 эти частоты равны 2,7 кГц, 2,1 кГц, 1 кГц. Это можно смотреть на рис. 5, на котором показана зависимость среднего квадратического значения виброускорения a от частоты возбуждающих импульсов f. Оба графика получены при напряжении питания $U_п$ = 150 В. При подвижном роторе опять появятся эти колебания и не зависят от частоты вращения ротора. В общее изменение частоты вращения ротора при неизменной частоте возмущающих импульсов фактически сохраняет характер вибрации. Таким образом, не рекомендуется на рабочем режиме подавать питание с такими частотами. Кроме этого график зависимости виброускорения a от частоты возмущающих импульсов тока f позволяет оценить качество подшипниковых узлов, неравномерности воздушного зазора между зубцовыми парами в разных положениях ротора. Такие проблемы имеются на примере ВИМ 8/6, так как обнаружено существенное возрастание уровня вибраций, как на высоких, так и на низких частотах. Факторами, определяющими график a(t), являются частота повторения возмущающих импульсов, длительности импульсов тока и бестоковых пауз, напряжения, прикладываемые к фазе на этапах нарастания и спадания тока, угол поворота ротора и т.п.

Литература

1. Способ управления вентильно-индукторным электродвигателем. Патент РФ 2241302, кл. H02P6/ Бычков М.Г., Семенчук В.А., – Опубл. 27.11.2004.
2. Пат. 2241302 РФ, МПК H02P6/12. Способ снижения шума реактивного индукторного двигателя/ Пахомин С.А., Сулейманов У.М., – Опубл. 27.04.2001, Бюл. № 4.
3. Пат. 2166228 РФ, МПК H02P6/00, H02P8/00. способ управления вентильно-индукторным электродвигателем / Пахомин С.А., Сулейманов У.М., – Опубл. 27.04.2001, Бюл. № 4.
4. Бычков М. Г. Основы теории, управление и проектирова-ниевентильно-индукторного электропривода: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. – М., 1999. – 354 с.
5. Темирёв А. П. «Анализ и синтез электрогидравлической системы «вентильно-индукторный привод -центробежный насос» дизель-электрической подводной лодки: Монография/ Темирёв А. П., Анисимов А. В., НгуенКуангКхоа; ЮРГТУ (НПИ). -Новочеркасск: ЛИК, 2013 г.- 428 с.