

УДК 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОДВИГАТЕЛЯ

В.Н. Дмитриев, А.Л. Кислицын, Д.И. Дунаев

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия
dunaeff.dima2015@yandex.ru

Резюме: Рассматривается возможность торможения асинхронного дебалансного вибродвигателя путем конденсаторного противовключения. Приводятся результаты математического моделирования режимов выбега и торможения путем конденсаторного противовключения асинхронного вибродвигателя.

Ключевые слова: вибрационные машины, дебалансный асинхронный вибродвигатель, резонанс, торможение, конденсаторное противовключение.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-82-88

RESEARCH OF BRAKING MODES OF ASYNCHRONOUS VIBRATION MOTOR DEBELYANOVO

V.N. Dmitriev, A.L. Kislitsyn, D.I. Dunaev

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
dunaeff.dima2015@yandex.ru

Abstract: The possibility of braking the asynchronous unbalanced vibration motor through the capacitor of the opposition. The results of mathematical modeling modes, coasting and braking by condensing opposition asynchronous vibration motor.

Keywords: vibratory machines, unbalanced asynchronous vibration motor, resonance, inhibition, opposition condenser.

В настоящее время широкое применение на практике получили вибрационные машины и установки на базе дебалансных асинхронных вибродвигателей (АДВД), работающих в зарезонансной зоне частотной характеристики (вибростенды, сейсмоиспытательные установки, виброплощадки и т.д.) [1]. В связи с этим интерес к изучению процессов в вибрационных системах прослеживается как у отечественных, так и у зарубежных исследователей [2–4]. Установлено, что одним из существенных недостатков вибрационных зарезонансных машин является период остановки. Как правило, на практике для остановки АДВД до настоящего времени часто применяют торможение выбегом, в течение которого резонансные амплитуды могут в несколько раз превосходить амплитуды колебаний системы в установившемся режиме, это может привести к опасному росту напряжений в деталях и выходу из строя элементов электропривода [5–7]. Решением данной проблемы занимались многие ученые, что привело к разработке различных методов уменьшения колебаний вибрационных машин зарезонансного типа, таких как использование вибровозбудителей с автоматически или вручную регулируемым

статическим моментом дебалансов, применение управляемых динамических гасителей колебаний [1] и др. В работах [6–8] исследуется конденсаторное торможение АДВД вибрационных машин. Устройства конденсаторного торможения позволяют, наряду с торможением АДВД, использовать конденсаторы для повышения коэффициента мощности сети в рабочем режиме вибрационного привода. Однако диапазон действия конденсаторного торможения весьма ограничен и может не совпадать с зоной резонанса [6]. Таким образом, вопрос ускоренного прохождения резонансной зоны вибрационной машиной при торможении является актуальным и требует дальнейших исследований.

В настоящей работе рассматривается способ торможения зарезонансных вибрационных машин путем перевода АДВД из рабочего трехфазного режима с компенсацией реактивной мощности в режим конденсаторного противовключения.

Рассмотрим процессы торможения АДВД на примере динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний с двумя вибродвигателями, показанной на рис. 1.

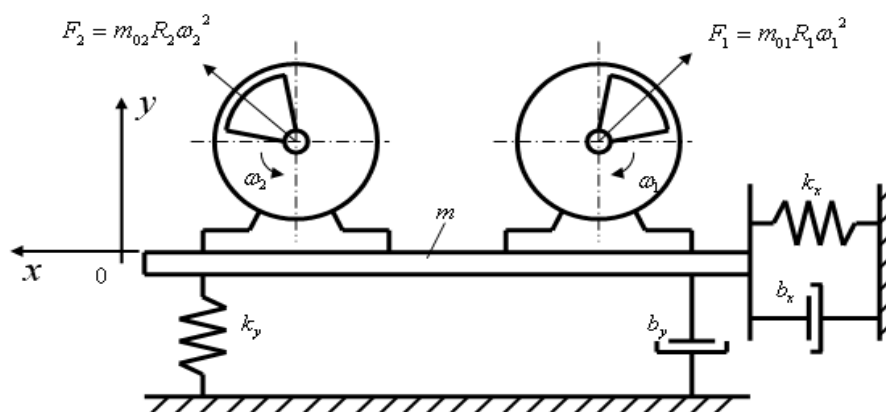


Рис. 1. Одномассовая вибрационная система направленных колебаний

Уравнения движения представленной вибрационной системы имеют вид [6; 9]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_{0i} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_x \frac{dx}{dt} + k_x x = \sum_{i=1}^2 m_{0i} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t; \quad (2)$$

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = M_{\text{ЭМ}i} - M_{\text{ВИБ}i} - m_{0i} R_i g \sin \omega_i t - M_{\text{МЕХ}i}, \quad (3)$$

где m – масса виброплатформы с грузом; y и x – смещение виброплатформы по осям Y и X ; b_y и b_x – коэффициенты сопротивления системы по осям Y и X ; k_y и k_x – жесткости упругих связей по осям Y и X ; m_{0i} – масса i -го дебаланса; R_i – эксцентриситет i -го дебаланса; g – ускорение свободного падения; J_i – приведенный момент инерции i -го электродвигателя; $M_{\text{ЭМ}i}$ – электромагнитный момент на валу i -го электродвигателя; $M_{\text{МЕХ}i}$ – момент сопротивления на валу i -го электродвигателя, обусловленный механическими потерями; $M_{\text{ВИБ}i}$ – вибрационный момент на валу i -го электродвигателя; ω_i – скорость вращения вала i -го электродвигателя.

Уравнения (1) и (2) описывают движение виброплатформы согласно второму закону Ньютона в проекциях на оси X и Y соответственно, а уравнение (3) – равновесие моментов на валу i -го двигателя соответственно.

Вибрационный момент i -го вибродвигателя имеет две составляющие:

$M_{\text{ВИБР}iY} = F_{Xi} \cdot y$ – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси Y и проекции центробежной силы i -го АДВД на оси X , где F_{Xi} определяется по формуле

$$F_{Xi} = m_{0i} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t.$$

$M_{\text{ВИБР}iX} = F_{Yi} \cdot x$ – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси X и проекции центробежной силы i -го АДВД на оси Y , где F_{Yi} определяется по формуле

$$F_{Yi} = m_{0i} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t.$$

Результирующее значение вибрационного момента, приложенного к валу i -го АДВД, определяется формулой

$$M_{\text{ВИБР}i} = F_{Xi} \cdot y + F_{Yi} \cdot x.$$

Электромагнитные процессы в каждом АДВД описываются по выражениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \\ 0 = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{array} \right. \quad 4)$$

где u_A, u_B, u_C – значения фазных напряжений статора, в процессе торможения соответствующие напряжения равны нулю; $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ – активные сопротивления обмоток статора и приведенные активные сопротивления обмоток ротора; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – фазные токи статора и ротора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток.

Потокосцепление АДВД определяется выражением в матричной форме:

$$[\psi] = [M] \times [i],$$

где $[\psi] = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c]$ – матрица-столбец потокосцеплений; $[i] = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]$ – матрица-столбец токов; $[M]$ – матрица индуктивностей.

Уравнение электромагнитного момента с учетом вышесказанного:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p M \left[(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \right],$$

где M – взаимная индуктивность; p – число пар полюсов АДВД.

Рассматривается вариант одноключевой схемы реверса асинхронного двигателя с конденсаторно-тиристорным коммутатором, показанная на рис. 2 [10].

Для пуска электродвигателя M включается трехфазный выключатель QF , и электродвигатель M работает в обычном трехфазном режиме. Коммутационные элементы (симисторы) $T1$ и $T2$ открыты, конденсаторы $C1, C2, C3$ подключены параллельно фазам сети и обеспечивают компенсацию реактивной мощности.

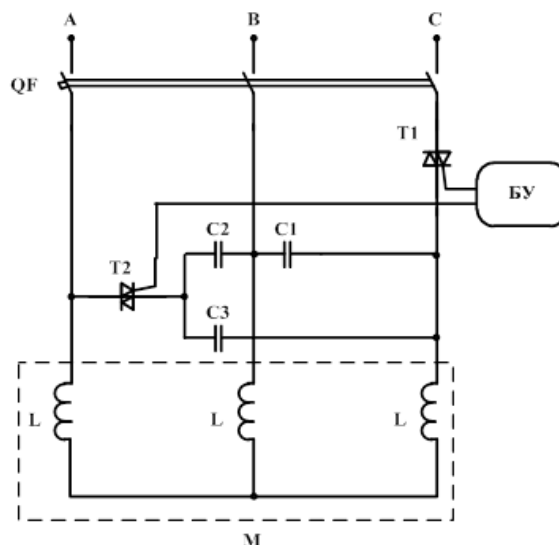


Рис. 2. Одноключевая схема реверса АДВД

При команде с блока управления (БУ) на торможение, симисторы $T1$ и $T2$ запираются и двигатель M переходит в режим противобращения, в котором фазные обмотки L фазы A и B подключены через конденсаторы $C2$ и $C3$ на линейное напряжение U_{AB} , а третья фазная обмотка L вместе с конденсаторами $C1$, $C2$, $C3$ подключена к той из фаз сети, напряжение которой опережает на 120° напряжение фазы, к которой подключен симистор $T1$ (фаза C). Наличие конденсаторов $C1$, $C2$, $C3$ (при правильно выбранной величине ёмкости) меняет фазу тока в обмотке L фазы C , что меняет порядок чередования фаз обмоток и обеспечивает режим противобращения АДВД.

При остановке АДВД отключается от сети.

Величина эквивалентной ёмкости трех конденсаторов в режиме противобращения для схемы «звезда» рассчитывается исходя из обеспечения заданного момента противобращения по формуле

$$C_k = 2780 \frac{I_{пр}}{U_n},$$

где $I_{пр}$ – ток противобращения; U_n – номинальное напряжение.

Для обеспечения симметрии напряжений в трехфазном режиме ёмкости конденсаторов выбираются равными по величине, тогда, исходя из заданной эквивалентной ёмкости и схемы соединения конденсаторов, ёмкость каждого конденсатора определится по формуле

$$C = \frac{2}{3} C_k.$$

В конденсаторном режиме противобращения систему уравнений (4) необходимо дополнить соотношением

$$U_C = U_B - \frac{1}{C_k} \int i_C dt,$$

где C_k – ёмкость фазосдвигающего конденсатора.

Представленная система нелинейных дифференциальных уравнений эффективно решается с помощью вычислительной техники с использованием численных методов интегрирования и дифференцирования. Для этих целей была создана математическая

модель рассматриваемой вибрационной системы и асинхронного дебалансного электродвигателя с конденсаторами в программной среде МВТУ 3.7, проведены исследования тормозных режимов работы машины.

Основные параметры вибростенда: $m=172$ кг; $b_y=800$ Н/м; $b_x=500$ Н/м; $k_y=3000000$ кг·м/с²; $k_x=390000$ кг·м/с². Тип вибродвигателя ИВ – 105–2,2 на базе АДВД с параметрами: $P_H=2,2$ кВт; $n_1=3000$ об/мин; $R_1=3,13$ Ом; $L_1=0,015$ Гн; $R_2=5,7$ Ом; $L_2=0,010$ Гн; $L_m=0,51$ Гн; $J_d=0,0034$ кг·м²; $m_0=3,7$ кг; $r_0=0,06$ м. Емкость конденсаторов: $C1=C2=C3=390$ мкФ.

На рис. 3 показаны расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД, электромагнитного момента и амплитуды колебаний по оси Y при выбеге. Из осциллограмм можно заключить, что изменение скорости от номинального значения до нуля происходит за время 3,75 с, при этом амплитуда колебаний области резонансной частоты системы ($\omega_{рез}=118,5$ рад/с), достигает 34 мм.

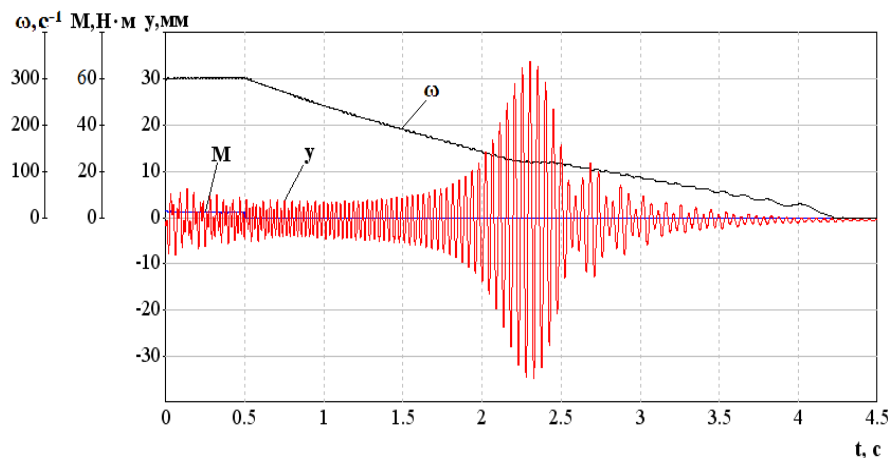


Рис. 3. Частота вращения АДВД, электромагнитный момент и смещение системы по оси Y при выбеге

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы изменения электромагнитного момента, частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси Y при торможении конденсаторным противовключением. Определено, что оптимальный тормозной момент, для данной резонансной частоты вибрационной системы, достигается при минимальной эквивалентной емкости $C3 = 260$ мкФ.

В ходе исследований было установлено, что использование конденсаторного противовключения АДВД ведет к ускоренному прохождению механической системы зоны резонанса и приводит к уменьшению резонансных амплитуд колебаний вибрационной системы по сравнению с наблюдаемым в процессе торможения выбегом.

Время торможения уменьшается более чем в три раза, а амплитуда колебаний в резонансной зоне уменьшается в 1,6 раза. Это позволяет существенно повысить надежность зарезонансных вибрационных машин.

Опытный образец рассматриваемого вибростенда был внедрен в 2017 году при развитии экспериментально-испытательной базы ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Результаты промышленных испытаний и успешный опыт эксплуатации подтвердили теоретические и расчетные данные.

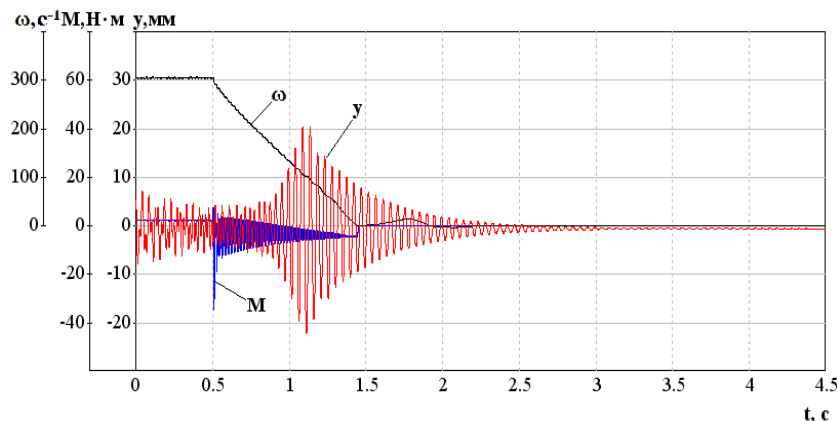


Рис. 4. Частота вращения АДВД, электромагнитный момент и смещение системы по оси Y при конденсаторном торможении

Выводы

1. Конденсаторное торможение АДВД позволяет существенно сократить время торможения и максимальные резонансные амплитуды колебаний машины, исключив, тем самым, неблагоприятные режимы ее работы.

2. Представленная математическая модель позволяет с необходимой точностью проводить исследования переходных установившихся процессов электропривода при различных параметрах АД, вибрационной системы и тормозных конденсаторов.

Литература

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб: ИД «Руда и Металлы», 2013. 640 с.
2. Jnoue J. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom / J. Jnoue, Y. Araki, M. Hirakawa. «Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977», Berlin e.a., 1978. P. 75–86.
3. Алимхаджаев К.Т. Взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибродвигателях // Электротехника. 2003. № 8. С. 20–24.
4. Шестаков В.М., Белокузов Е.В., Епишкин А.Е. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок // Электричество. 2013. №11. С. 31–35.
5. Кракиновский Л.М. Определение максимальной амплитуды колебаний при выбеге вибромашин // Вибрационная техника: материалы семинара. М.: МДНТП, 1971. № 2. С. 129–136.
6. Дмитриев В.Н., Гаврилов Е.Н. Переходные процессы резонансных вибрационных машин // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. № 4. С. 52–55.
7. Гаврилов Е.Н. Динамические процессы резонансных вибрационных машин // Вестник Казанского технологического университета. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. Т. 16. № 12. С. 87–90.
8. Гаврилов Е.Н. Исследование тормозных режимов резонансных вибрационных транспортирующих машин // Вестник Казанского технологического университета. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. Т. 16, № 12. С. 84–87.
9. Гаврилов Е.Н. Математическое описание одномассовой вибрационной транспортирующей машины // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 1. С. 339–343.
10. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л. Судовые электромеханические устройства ввода-вывода информации. М.: Энергоатомиздат, 2006. 253 с.

Авторы публикации

Дмитриев Владимир Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Кислицын Анатолий Леонидович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Дунаев Дмитрий Иванович – аспирант кафедры «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

References

1. Blekhman I.I. Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika. SPb: ID «Ruda i Metally», 2013. 640 s.
2. Jnoe J. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom / J. Jnoe, Y. Araki, M. Hirakawa. «Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977», Berlin e.a., 1978. P. 75–86.
3. Alimkhadzaev K.T. Vzaимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибровибрателях // *Elektrotehnika*. 2003. №8. S. 20–24.
4. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. Sintez zakonov upravleniya rezhimami raboty avtomatizirovannykh vibratsionnykh ustanovok // *Elektrichestvo*. 2013. №11. S. 31–35.
5. Krakinovskii L.M. Opredelenie maksimal'noi amplitudy kolebaniy pri vybege vibromashin // *Vibratsionnaya tekhnika: materialy seminarov*. M.: MDNTP, 1971. № 2. S. 129–136.
6. Dmitriev V.N., Gavrilov E.N. Perekhodnye protsessy zarezonansnykh vibratsionnykh mashin // *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*. 2011. № 4. S. 52–55.
7. Gavrilov E.N. Dinamicheskie protsessy zarezonansnykh vibratsionnykh mashin // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. Kazan': Izd-vo KNITU. 2013. T. 16. № 12. S. 87–90.
8. Gavrilov E.N. Issledovanie tormoznykh rezhimov zarezonansnykh vibratsionnykh transportiruyushchikh mashin // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. Kazan': Izd-vo KNITU. 2013. T. 16. № 12. S. 84–87.
9. Gavrilov E.N. Matematicheskoe opisanie odnomassovoi vibratsionnoi transportiruyushchei mashiny // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. T. 18. № 1. S. 339–343.
10. Dmitriev V.N., Kislitsyn A.L. Sudovye elektromekhanicheskie ustroystva vvoda – vyvoda informatsii. M.: Energoatomizdat, 2006. 253 s.

Authors of the publication

Vladimir N. Dmitriev – dr. tech. sciences, professor, Department of electrical and APU, Ulyanovsk state technical University.

Anatoly L. Kislitsyn – cand. tech. sciences, professor, Department of electrical and APU, Ulyanovsk state technical University.

Dmitriy I. Dunaev – postgraduate student, Department of electrical and APU, Ulyanovsk state technical University.

Поступила в редакцию

22 ноября 2017 года.