

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРНОГО ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ВИБРОДВИГАТЕЛЯ

Асинхронные вибродвигатели широко применяются на практике, но при этом имеют существенный недостаток – резкое увеличение амплитуд колебаний при прохождении зоны резонанса в процессе пуска и выбега, что отрицательно сказывается на их работе. Многие исследователи решали данную проблему: использование двигателей со значительным резервом мощности (30-70%), конденсаторное торможение. Однако резерв мощности ухудшает энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности в рабочем режиме), а конденсаторное торможение весьма ограничено и может не совпадать с зоной резонанса. Цель исследования – рассмотрение и анализ частного случая, при котором происходит застревание ротора асинхронного вибродвигателя на околорезонансной частоте при прохождении зоны резонанса выбегом, с целью выявления способа, позволяющего исключить данное явление. Для проведения исследований может применяться любой серийный асинхронный вибродвигатель с паспортными характеристиками. В настоящей работе исходными данными для исследования использовались паспортные характеристики серийного асинхронного вибродвигателя ИВ-105-2,2 с одноключевой схемой реверса и основные параметры вибрационной системы при минимальных значениях диссипативных сопротивлений. Создана математическая модель рассматриваемой вибрационной системы и асинхронного вибродвигателя при общепринятых допущениях (без учета потерь в стали, высших гармоник магнитного поля при равномерном воздушном зазоре и напряжении питания, являющимися симметричной системой синусоидальных напряжений) в программной среде МВТУ 3.7. Предложен способ применения одноключевой схемы реверса с конденсаторно-тиристорным коммутатором, позволяющий уменьшить колебания в зоне резонанса и предотвратить застревание ротора асинхронного вибродвигателя на околорезонансной частоте, при прохождении через зону резонанса. Получены расчетные осциллограммы переходных процессов. Корректное применение математического аппарата позволяет утверждать, что при проведении исследований с различными серийными асинхронными вибродвигателями полученные результаты совпадают, это доказывает эффективность применения одноключевой схемы реверса, что позволит повысить надежность асинхронных вибродвигателей и увеличить срок эксплуатации электропривода.

**Ключевые слова:** вибрационные машины, асинхронный вибродвигатель, резонанс, пуск, торможение, амплитуда колебаний, конденсаторное противовключение.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое применение на практике получили вибрационные машины и установки на базе асинхронных дебалансных вибродвигателей (далее АДВД), работающих в зарезонансной зоне частотной характеристики (сейсмоиспытательные установки, виброплощадки и т.д.) [1]. Исходя из этого, процесс изучения вибрационных систем прослеживается у отечественных и у зарубежных исследователей [2-4].

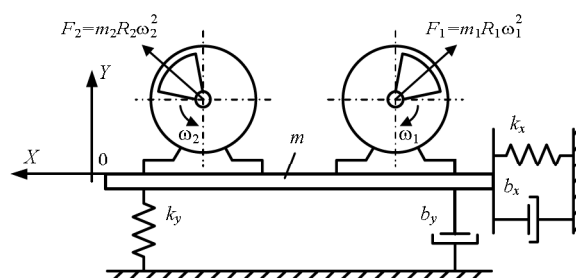
Недостатком АДВД зарезонансного типа является резкое увеличение амплитуд колебаний при прохождении зоны резонанса в процессе торможения выбегом, резонансные амплитуды могут в десятки раз превосходить амплитуды колебаний при установившемся режиме работы, что является недопустимым с точки зрения нормальной эксплуатации [5]. Торможение выбегом является неэффективным, так как при достижении, в процессе выбега, скорости электродвигателя области резонансных частот вибрационной системы может произойти застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте с выраженными максимальными амплитудами колебаний. Это ведет к увеличению времени действия переходных механических нагрузок на грузонесущий орган и его конструктивные элементы, что может неблагоприятно сказаться на целостности электродвигателя в целом. Таким образом, оценка амплитуд колебаний при прохождении через резонансную зону является обязательной

при расчете и проектировании вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями.

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе рассматриваются динамические режимы зарезонансных вибрационных машин путем перевода АДВД из рабочего трехфазного режима с компенсацией реактивной мощности в режим конденсаторного противовключения, обеспечивающего быстрое прохождение машины резонансной области работы вибрационной машины. Смоделирован эффект застревания дебалансного ротора АДВД на околорезонансной частоте при торможении выбегом.

Рассмотрим процесс пуска и торможения АДВД на примере динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний с двумя вибродвигателями, представленной на **рис. 1**, которая является характерной для большинства промышленных вибрационных машин.



**Рис. 1. Одномассовая вибрационная система направленных колебаний**

Уравнения движения представленной вибрационной системы имеют вид [6-8]:

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

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

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

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;  $M_{\Sigma Mi}$  – 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;  $\omega_i$  – 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 двигателей соответственно.

Вибрационный момент  $i$ -го вибродвигателя имеет две составляющие:

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

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

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

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

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

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

В работе [9] проведено описание реверса АД с применением одноключевых схем.

Для проведения исследования динамических режимов АДВД в системе, представленной на **рис. 1**, в математической модели используется одноключевая схема реверса АДВД с конденсаторно-тиристорным коммутатором, представленная 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.

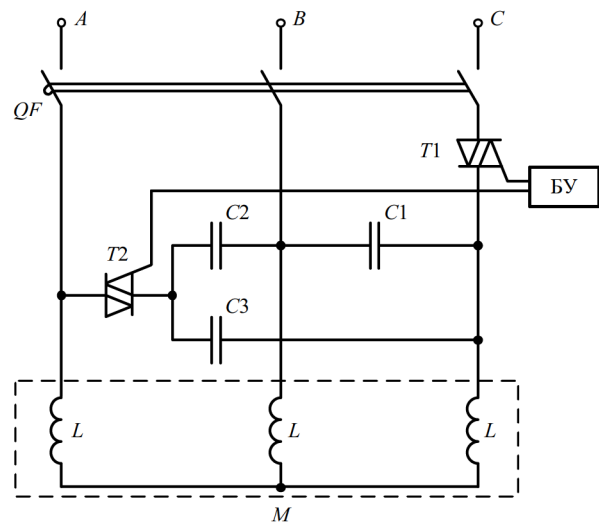


Рис. 2. Одноключевая схема реверса АДВД

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.

При команде с блока управления (БУ) на торможение симисторы  $T1$  и  $T2$  запираются и двигатель  $M$  переходит в режим противовключения, 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  $120^\circ$  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 противовключения АДВД. При остановке АДВД отключается от сети.

Величина, эквивалентная емкости трех конденсаторов в режиме противовключения для схемы «звезда», рассчитывается исходя из обеспечения заданного момента противовключения по формуле

$$C_K = 2780 \frac{I_{\text{пр}}}{U_n},$$

где  $I_{\text{пр}}$  – ток противовключения,  $U_n$  – номинальное напряжение.

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

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

При торможении конденсаторным противовключением электромагнитные процессы в каждом АДВД описываются по выражениям, которые описаны также в работах [5-8]:



$$\begin{cases} U_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \\ 0 = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – значения фазных напряжений статора;  $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$  – 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.

В конденсаторном режиме противовключения системы уравнений (4) необходимо дополнить соотношением

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

где  $C_K$  – емкость фазосдвигающего конденсатора.

Потокасцепление АДВД определяется выражением в матричной форме:

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

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

Уравнение электромагнитного момента с учетом вышесказанного определяется так:

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

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

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, при общепринятых допущениях (без учета потерь в стали, высших гармоник магнитного поля при равномерном воздушном зазоре и напряжении питания, являющимися симметричной системой синусоидальных напряжений) в программной среде МВТУ 3.7, проведены исследования динамических режимов работы машины. В ходе проведения исследований также использовались конденсаторы как с наименьшим значением, так и с наибольшим значением от оптимально выбранной емкости конденсаторов, которая позволяет избежать застревания ротора АДВД.

Приведены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний в процессе торможения при изменяемых значениях емкостей конденсаторов.

Основные параметры вибрационной системы:  $m=172$  кг,  $b_y=119,45$  Н/м,  $b_x=100$  Н/м,  $k_y=3 \cdot 10^6$  кг·м/с<sup>2</sup>,  $k_x=390000$  кг·м/с<sup>2</sup>. 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·м<sup>2</sup>,  $m_0=3,7$  кг,  $r_0=0,06$  м.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении выбегом. Из осциллограмм можно заключить, что при малых диссипативных сопротивлениях  $b_y=119,45$  Н/м,  $b_x=100$  Н/м и отключении питания вибродвигателя происходит застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте. Это вызвано поддержанием скорости вращения ротора АДВД путем «подталкивания» грузонесущего органа за счет колебаний вибрационной системы, время вращения составляет 1,75 с. При этом амплитуда колебаний области резонансной частоты системы ( $\omega_{\text{рез}}=120$  рад/с), доходит до 13 мм.

Пусковой режим АДВД при заданных параметрах вибрационной системы не вызывает затруднений, так как происходит при малых диссипативных сопротивлениях.

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения, при этом емкость конденсаторов равна  $C1=C2=C3=220$  мкФ, что позволяет избежать застревания ротора АДВД. Время торможения уменьшается более чем в пять раз, а амплитуда колебаний в резонансной зоне уменьшается в 1,9 раза, что позволяет повысить надежность зарезонансных вибрационных машин. При этом в рабочем режиме конденсаторы повышают коэффициент мощности АДВД.

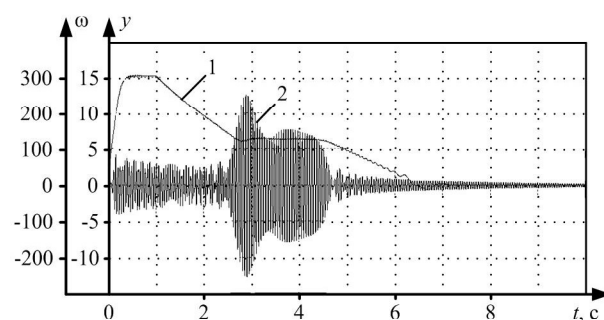


Рис. 3. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при выбеге: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

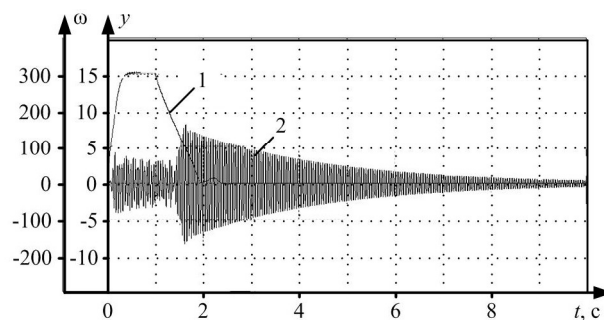


Рис. 4. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения при  $C1=C2=C3=220$  мкФ: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

На рис. 5 представлены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний в процессе торможения при аналогичных условиях.

На рис. 6 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения с емкостью конденсаторов  $C1=C2=C3=560$  мкФ. Из осциллограмм видно, что при заданной емкости конденсаторов время торможения составляет 4,5 с, а амплитуда колебаний системы достигает 13 мм. Также наблюдается кратковременное застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте. На рис. 7 представлены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний при аналогичных условиях.

На рис. 8 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения с емкостью конденсаторов  $C1=C2=C3=82$  мкФ. Из осциллограмм видно, что при заданной емкости конденсаторов время торможения составляет 5,2 с, а амплитуда колебаний системы достигает 13 мм. Также наблюдается кратковременное застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте. На рис. 9 представлены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний при аналогичных условиях.

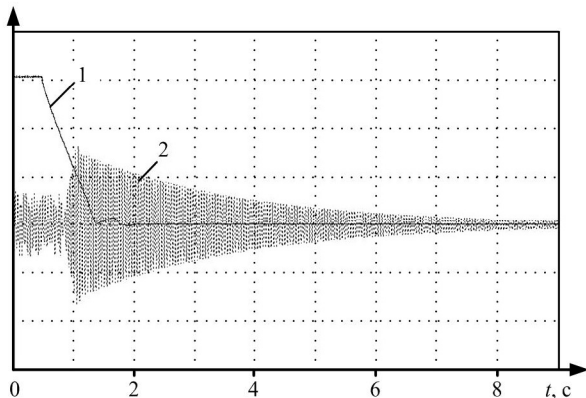


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы: 1 – частота вращения (100 рад/с/дел); 2 – вибросмещение (5 мм/дел)

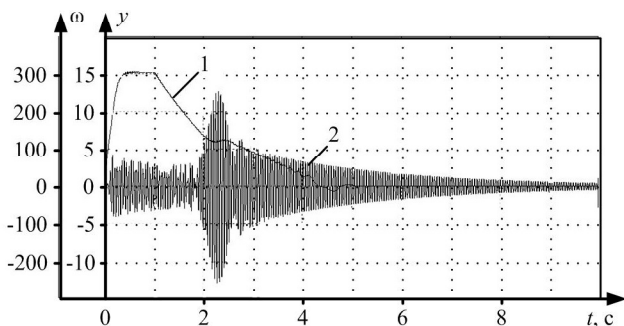


Рис. 6. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения при  $C1=C2=C3=560$  мкФ: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

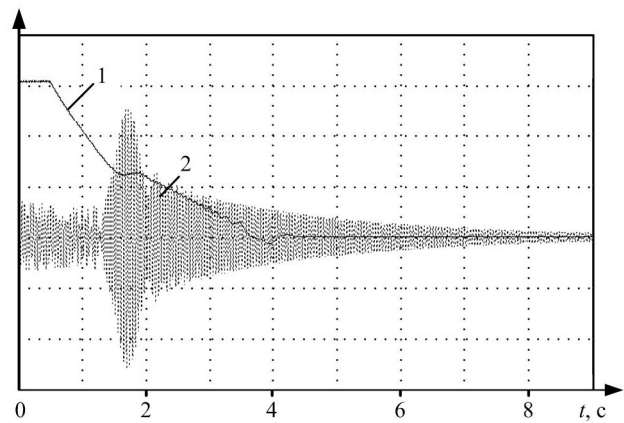


Рис. 7. Экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы: 1 – частота вращения (100 рад/с/дел); 2 – вибросмещение (5 мм/дел)

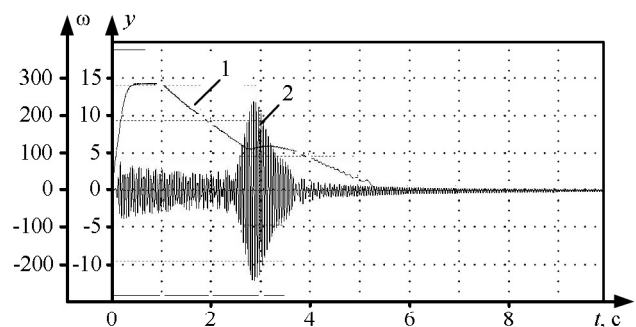


Рис. 8. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения при  $C1=C2=C3=82$  мкФ: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

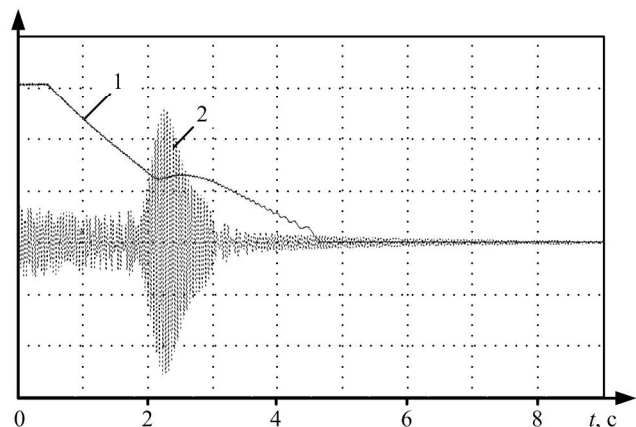


Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы: 1 – частота вращения (100 рад/с/дел); 2 – вибросмещение (5 мм/дел)

На рис. 10 представлены осциллограммы функций изменения амплитуды колебаний системы и времени торможения АДВД в зависимости от эквивалентной емкости конденсаторов. Из осциллограмм можно заключить, что при уменьшении или увеличении емкости конденсаторов от оптимально выбранного значения происходит увеличение амплитуды колебаний системы и времени торможения АДВД.



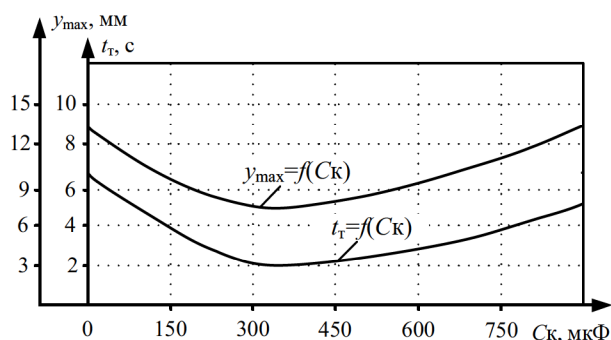


Рис. 10. Осциллограммы изменения амплитуды колебаний системы и времени торможения АДВД от значения эквивалентной емкости конденсаторов

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

##### 1. Установлено, что:

– на характер процесса выбега АДВД существенно влияет величина кинетической энергии, накопленная механической частью вибрационной системы;

– длительное нахождение рабочей точки электро-механической характеристики АДВД в области собственных частот колебаний вибрационной машины приводит к увеличению максимальных переходных амплитуд колебаний системы, негативно влияющих на конструктивную надежность электродвигателя в целом.

2. Пуск АДВД при заданных параметрах вибрационной системы не вызывает затруднений, так как происходит при малых диссипативных сопротивлениях.

3. Способ торможения конденсаторным противовключением позволяет существенно сократить время торможения и уменьшить амплитуду резонансных колебаний. При этом в рабочем режиме конденсаторы повышают коэффициент мощности АДВД.

4. Выбор оптимальных значений конденсаторов позволяет сократить время торможения АДВД и уменьшить в разы амплитуды колебаний при торможении конденсаторным противовключением, что способствует исключению неблагоприятных режимов работы.

5. Опытный образец рассматриваемого вибростенда с применением одноключевой схемы реверса АДВД с конденсаторно-тиристорным коммутатором был внедрен в августе 2018 года при развитии эксперимен-

тально-испытательной базы ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров. Результаты промышленных испытаний и успешный опыт эксплуатации подтвердили теоретические и расчетные данные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Руда и Металлы, 2013. 640 с.
2. Шестаков В.М., Белокузов Е.В., Епишкин А.Е. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок // Электричество. 2013. №11. с. 31-35.
3. Jnoe J., Araki Y., Hirakawa M. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom. «Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977», Berlin e. a., 1978. pp. 75–86.
4. Michalczyk J. Angular oscillations of vibratory machines of independent driving systems caused by a non-central direction of the exciting force operations. Arch. Min. Sci., Vol. 57, №1, Warszawa, 2012. pp. 169-177.
5. Гаврилов Е.Н. Динамические процессы зарезонансных вибрационных машин // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №12 (16). С. 87–90.
6. Гаврилов Е.Н. Математическое описание одномассовой вибрационной транспортирующей машины // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №1 (18). С. 339–343.
7. Дмитриев В.Н., Лунина Н.А., Дунаев Д.И. Математическое моделирование асинхронного вибрационного электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 7-9 октября 2014 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т1. С. 312-315.
8. Гаврилов Е.Н. Разработка и исследование асинхронного дебалансного электропривода зарезонансных вибрационных транспортирующих машин с пуско-тормозным конденсаторным устройством: дис ... канд. техн. наук. 05.09.03 / Гаврилов Евгений Николаевич. Ульяновск, 2012.
9. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л. Судовые электромеханические устройства ввода – вывода информации. М.: Энергоатомиздат, 2006. 253 с.
10. Пат. 2657010 Российская Федерация, МКП H02P3/20. Асинхронный электропривод / Д.И. Дунаев, С.Н. Жирнов, Р.Н. Шакиров; заявитель ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». №2017111161; заяв. 03.04.2017; опубл. 08.06.2018.

Поступила в редакцию 18 сентября 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### STUDYING OF CONDENSING OPPOSITE CONNECTION IN THE BRAKING MODE OF AN ASYNCHRONOUS VIBRATION MOTOR

Anatoly L. Kislitsyn

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: alk37@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3023-388X>.

Dmitry I. Dunaev

Postgraduate Student, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: dunaeff.dima2015@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9626-3419>.

Sergei N. Zhirnov

Postgraduate Student, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: zhirnov1980@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5608-7393>.

Asynchronous vibrating motors are widely used in practice but they have a significant drawback, a sharp increase in the amplitude of oscillations during the passage of the resonance zone during the start-up and run-out, which negatively affects their operation. Many researchers solved this problem: the use of engines with a significant power reserve (30-70%) or capacitor braking. However, the power reserve degrades energy performance (efficiency and power factor in the operating mode) and capacitor braking is very limited and may not coincide with the resonance zone.

The purpose of the study is to examine and analyze the particular case in which the vibration of the rotor of a vibrating motor at a near resonance frequency occurs when the resonance zone travels by coasting in order to identify the method that makes it possible to exclude this phenomenon. To carry out the research, any serial vibration motor with passport characteristics can be applied. In the present work, the initial data for the study, the research group used the passport characteristics of the IV-105-2.2 serial vibrator with a single-key reverse circuit and the main parameters of the vibration system with the minimum values of dissipative resistances. A mathematical model of the considered vibration system and a vibration motor is developed under the generally accepted assumptions (without taking into account losses in steel, higher harmonics of the magnetic field with uniform air gap and supply voltage, which are a symmetric system of sinusoidal stresses) in the software environment of the MVTU 3.7.

A method for applying a single-key reverse circuit is proposed, which makes it possible to reduce oscillations in the resonance zone and to prevent a jamming of the rotor of the vibration motor at the near resonance frequency while passing through the resonance zone. Calculated oscillograms of transient processes were obtained. The correct application of the mathematical apparatus allows us to state that the results obtained coincide with the various serial vibrators which proves the effectiveness of using a single-key reverse circuit while increasing the reliability of vibrating machines and increasing the life of the electric drive.

**Keywords:** vibration machines, asynchronous vibrating motor, resonance, start-up, braking, amplitude of oscillations, capacitor counter-induction.

#### REFERENCES

1. Blekhman I.I. *Teoriya vibratsionnykh processov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika* [Theory of vibration processes and devices. Vibration mechanics and

vibration technology]. St-Petersburg, Ruda i Metally, 2013. 640 p. (In Russian)

2. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. Synthesis of the laws governing the operating modes of automated vibration units. *Ehlektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 11, pp. 31-35. (In Russian)
3. Jnoue J., Y. Araki, M. Hirakawa. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom. "Dyn. Multi-body Syst. Symp., Munich, 1977", Berlin e. a., 1978, pp. 75-86.
4. Michalczyk J. Angular oscillations of vibratory machines of independent driving systems caused by a non-central direction of the exciting force operations. *Arch. Min. Sci.*, vol. 57, no. 1, Warszawa, 2012. pp. 169-177.
5. Gavrilov E.N. Dynamic processes of resonant vibration machines. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State University], 2013, no. 12 (16), pp. 87-90. (In Russian)
6. Gavrilov E.N. Mathematical description of a singlemass vibrating transporting machine. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State University], 2015. no. 1 (18), pp. 339-343. (In Russian)
7. Dmitriev V.N., Lunina N.A., Dunaev D.I. Mathematical modeling of an asynchronous vibrating electric drive. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomy elektroprivodu AEP-2014 (Saransk, 7-9 oktyabrya 2014 g.)* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014 (Saransk, October 7-9, 2014)]. Saransk: Mordov Publishing House. Univ., 2014, Vol. 1, pp. 312-315. (In Russian)
8. Gavrilov E.N. *Razrabotka i issledovanie asinhronnogo debalansnogo ehlektropivoda zarezonansnykh vibratsionnykh transportiruyushchikh mashin s pusko-tormoznym kondensatornym ustroystvom*. Kand. Diss. [Development and research of an asynchronous unbalanced electric drive of resonant vibrating transporting machines with a start-braking condenser device. Ph.D.Diss.]. Ulyanovsk, 2012.
9. Dmitriev V.N., Kislitsyn A.L. *Sudovye ehlektromekhanicheskie ustrojstva vvoda – vyvoda informatsii* [Ship electromechanical input-output devices]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2006. 253 p. (In Russian)
10. Dunaev D.I., Zhirnov S.N., Shakirov R.N. *Asinhronnyy elektropriwod* [Asynchronous electric drive]. Patent RF, no. 2756010, 2018.

Кислицын А.Л., Дунаев Д.И., Жирнов С.Н. Исследование конденсаторного противовключения в режиме торможения асинхронного вибродвигателя // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 11-16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-11-16)

Kislitsyn A.L., Dunaev D.I., Zhirnov S.N. Studying of Condensing Opposite Connection in the Braking Mode of an Asynchronous Vibration Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 11-16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-11-16)