

Введение Для вибрационных транспортирующих машин (ВТМ) с резонансной настройкой большое значение имеют переходные процессы, возникающие при свободном выбеге после отключения машины. Так как в этом процессе машина проходит через область резонанса, то возможно значительное увеличение амплитуды колебаний, в десятки раз превышающих рабочие значения, приводящее к поломке машины.[1] Одними из основных способов ограничения амплитуд при прохождении области резонанса в процессе торможения является метод противовключения вибровозбудителя ВТМ и использование вибровозбудителей с автоматически или вручную регулируемым статическим моментом дебалансов (при прохождении через резонанс статический момент уменьшается). Однако, изготовление регулируемых вибровозбудителей связано со значительными материальными затратами, а применение метода противовключения – с максимальными токовыми нагрузками и необходимостью дополнительной аппаратуры для определения момента отключения вибровозбудителя. С учетом недостатков описанных способов ограничения резонансных амплитуд, целью настоящей статьи является рассмотрение возможности применения способа конденсаторного торможения асинхронных дебалансных вибродвигателей (АДВД) ВТМ, не требующего значительных капитальных вложений на его использование. Эффективность конденсаторного способа торможения асинхронных двигателей и математическое описание данного процесса подробно описаны в работах Кашкалова В. И. и Петрова Л. П. Учитывая вышесказанное, задача описания и исследования процесса конденсаторного торможения АДВД ВТМ с учетом вибрационного момента нагрузки и момента сопротивления вызванного вращающимися дебалансными массами является актуальной. Математическое описание вибрационной системы с АДВД Рассмотрим поведение АДВД в процессе торможения на примере динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний (рисунок 1). Уравнения движения представленной на рисунке 1 вибрационной системы имеют вид [1,2]: (1) (2) Уравнения (1) описывают движение грузонесущего органа ВТМ согласно второму закону Ньютона, а уравнение (2) – закону равновесия моментов на валу i -го вибродвигателя. В уравнениях (1-2) обозначено: α – угол наклона грузонесущего органа к горизонту; β – угол направления вынуждающей силы; m_1 – масса грузонесущего органа с расположенными на нем двигателями; m_2 – масса груза, колеблющаяся в фазе с грузонесущим органом; m_{0i} – масса i -го дебаланса; R_i – эксцентриситет i -го дебаланса; g – ускорение свободного падения; y и x – смещение грузонесущего органа по осям Y и X (вибросмещение); \dot{y} и \dot{x} – скорость грузонесущего органа по осям Y и X ; \ddot{y} и \ddot{x} – ускорение грузонесущего органа по осям Y и X ; γ_y и γ_x – коэффициенты сопротивления системы по осям Y и X ; k_y и k_x – жесткости упругих связей по осям Y и X ; N и F – нормальная и касательная составляющие нагрузки от транспортируемого груза на грузонесущий орган; J_i – приведенный момент

инерции i -го электродвигателя; $MЭM_i$ – электромагнитный момент на валу i -го электродвигателя; $MMEХ_i$ – момент сопротивления на валу i -го электродвигателя, обусловленный механическими потерями; $MВИБР_i$ – вибрационный момент на валу i -го электродвигателя; ω_i – частота вращения вала i -го электродвигателя; $-$ проекция центробежной силы дебалансов на ось X ; $-$ проекция центробежной силы дебалансов на ось Y ; моменты сопротивления на валу i -го электродвигателя, вызванный весом дебаланса. Рис. 1 - Одномассовая вибрационная система В случае системы с двумя степенями свободы вибрационный момент i -го вибродвигателя имеет две составляющие: 1. – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси Y и проекции центробежной силы i -го дебалансного вибродвигателя на ось X , где определяется по формуле: 2. – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси X и проекции центробежной силы i -го дебалансного вибродвигателя на ось Y , где определяется по формуле: 3. Результирующее выражение вибрационного момента, приложенного к валу i -го вибродвигателя, определяется следующей формулой: . Процесс конденсаторного торможения осуществляется двумя степенями с различными значениями емкости, либо может производиться одной из ступеней. Схема, обеспечивающая конденсаторное торможение, имеет небольшую постоянно подключенную емкость (1 ступень, служащая также для компенсации реактивной мощности вибродвигателя в рабочем режиме) и подключаемую значительную емкость (2 ступень). Первая ступень обеспечивает начало торможения после отключения АДВД, а вторая – дальнейшее снижение скорости вибродвигателя в процессе торможения. При торможении электромагнитные процессы в каждом АДВД описываются по формулам: Здесь $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ – 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 в процессе торможения; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток в процессе торможения; u_{CA}, u_{CB}, u_{CC} – падение напряжения на тормозных конденсаторах в фазах двигателя. Потокосцепление АДВД определяется выражением в матричной форме: , 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, F – коэффициент, относительной частоты самовозбуждения АДВД в процессе торможения. Коэффициент относительной частоты самовозбуждения АДВД [3,4]: , где f – частота питающего напряжения, C – эквивалентная емкость тормозных конденсаторов, L – эквивалентная индуктивность фазы двигателя. Падение напряжения на тормозных конденсаторах в фазах двигателя: где C – емкость тормозных конденсаторов в фазе двигателя. Уравнение электромагнитного момента с учетом вышесказанного определяется: где M – взаимная индуктивность; p – число пар полюсов АДВД.. Методика исследования 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 вибрационной транспортирующей машины. Результаты математического моделирования Основные параметры вибротранспортера: $m=113\text{ кг}$, $b_y=b_x=1150\text{ Н/м}$, $k_y=k_x=316000\text{ кг*м/с}^2$, $\alpha=100$, $\beta=400$. Тип вибродвигателя ИВ - 105 - 2 на базе АДВД с параметрами: $P_H=1,1\text{ кВт}$, $n_H=1450\text{ об/мин}$, $R_1=9,53\text{ Ом}$, $L_1=0,037\text{ Гн}$, $R_2=5,619\text{ Ом}$, $L_2=0,029\text{ Гн}$, $L_m=0,447\text{ Гн}$, $J_d=0,0026\text{ кг/м}^2$, $m_0=1,5\text{ кг}$, $r_0=0,05\text{ м}$. Параметры пускового устройства: 1 ступень - $Ст1=60\text{ мкФ}$, 2 ступень - $Ст2=200\text{ мкФ}$. На рисунке 2 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний ВТМ по оси Y при выбеге. Из осциллограмм частоты вращения можно заключить, что изменение скорости от номинального значения до нуля происходит за достаточно длительный период времени. За это время амплитуда колебаний машины достигает максимальных значений в области резонансной частоты системы ($\omega_{рез}=52,8\text{ с}^{-1}$). Рис. 2 - Частота вращения АДВД и смещение системы по оси Y при выбеге На рисунке 3 представлены характеристики изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний ВТМ по оси Y при одноступенчатом конденсаторном торможении (2 ступень). Очевидно, что влияние отрицательного тормозного момента благоприятно сказывается на времени торможения, уменьшая последнее. В результате значения максимальных амплитуд машины при прохождении области резонанса значительно уменьшаются, что может положительно сказаться на надежной работе вибрационной транспортирующей машины. Рис. 3 - Частота вращения АДВД и смещение системы по оси Y при конденсаторном торможении (2 ступень) На рисунке 4 показаны характеристики изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний ВТМ по оси Y при двухступенчатом конденсаторном торможении (1 и 2 ступени). Из рисунка видно, что время торможения при данном типе торможения существенно сократилось. А максимальные резонансные амплитуды колебаний ВТМ практически отсутствуют, тем самым, исключаются критические условия работы транспортера. Рис. 4 - Частота вращения АДВД и смещение системы по оси Y при конденсаторном торможении (1 и 2 ступени). Выводы 1. Конденсаторное торможение АДВД ВТМ позволяет существенно сократить время торможения и максимальные резонансные амплитуды колебаний машины, исключив тем самым неблагоприятные режимы ее работы. 2. Двухступенчатое конденсаторное торможение АДВД ВТМ обладает более высокой эффективностью по сравнению с одноступенчатым торможением. Данное обстоятельство связано с тем, что тормозной момент, прикладываемый к АДВД, при двухступенчатом торможении присутствует практически на всем

протяжении процесса торможения машины.