

**А. П. ЧЕРНЫЙ, В. Ю. НОЖЕНКО, В. К. ТЫТЮК, О. К. ДАНИЛЕЙКО**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЗАРЕЗОНАНСНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ**

Рассмотрены особенности пуска электропривода вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями, работающих в резонансном режиме. В настоящее время для резонансных вибрационных машин применяют нерегулируемые асинхронные двигатели повышенной мощности, что необходимо для гарантированного прохождения резонансной зоны во время пуска. Основной причиной возможного «застывания» роторов приводных двигателей вибрационных машин является резкое возрастание вибрационного момента в резонансной зоне. Завышенная установленная мощность приводного двигателя является необходимым условием для превышения вращающего момента двигателя над моментом сопротивления вибрационной машины при прохождении резонансной зоны. Для снижения установленной мощности электропривода резонансной вибрационной машины предложено использование частотно-регулируемого электропривода со специальным законом частотного управления, обеспечивающим гарантированное преодоление резонансной зоны. Для увеличения момента приводных двигателей в процессе пуска предложено использование линейного закона частотного управления и дополнительного увеличения напряжения на период прохождения резонансной зоны вибромашины. В работе исследованы законы частотного управления с увеличением напряжения питания в виде ступеньки и в виде импульса при прохождении резонансной зоны. С помощью математического моделирования проведены исследования частотного пуска асинхронных двигателей резонансной вибрационной площадки, которая используется для уплотнения бетонных смесей. Показано, что увеличение напряжения в виде ступеньки обеспечивает уменьшение потерь в асинхронном двигателе в процессе пуска по сравнению с увеличением напряжения в виде импульса. Проведены экспериментальные исследования частотного пуска асинхронного двигателя с формированием ступенчатого увеличения напряжения питания на лабораторной установке, которые подтвердили возможность увеличения момента и ускорения двигателя во время пуска.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, резонансная вибрационная машина, пусковой режим, резонансная зона, скачкообразное увеличение напряжения.

**О. П. ЧОРНИЙ, В. Ю. НОЖЕНКО, В. К. ТИТЮК, О. К. ДАНИЛЕЙКО**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗАРЕЗОНАНСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ**

Розглянуто особливості пуску електроприводу вібраційних машин з дебалансними вібровозбудувачами, які працюють в резонансному режимі. На даний час для резонансних вібраційних машин застосовують нерегульовані асинхронні двигуни завищеної потужності, що необхідно для гарантованого подолання резонансної зони під час пуску. Основною причиною можливого «застійності» роторів приводних двигунів вібраційних машин є різке зростання вібраційного моменту в резонансній зоні. Завищена встановлена потужність приводного двигуна є необхідною умовою для перевищення обертового моменту двигуна над моментом опору вібраційної машини під час подолання резонансної зони. Для зниження встановленої потужності електроприводу резонансної вібраційної машини запропоновано використання частотно-регульованого електроприводу зі спеціальним законом частотного керування, що забезпечує гарантоване подолання резонансної зони. Для збільшення моменту приводних двигунів в процесі пуску запропоновано використання лінійного закону частотного керування і додаткового збільшення напруги живлення на період проходження резонансної зони вибромашини. У роботі досліджені закони частотного керування зі збільшенням напруги живлення у вигляді сходинок і у вигляді імпульсу під час подолання резонансної зони. За допомогою математичного моделювання проведено дослідження частотного пуску асинхронних двигунів резонансної вібраційної площадки, яка використовується для ущільнення бетонних сумішей. Показано, що збільшення напруги у вигляді сходинок забезпечує зменшення втрат у асинхронному двигуні у процесі пуску порівняно зі збільшенням напруги у вигляді імпульсу. Проведено експериментальні дослідження частотного пуску асинхронного двигуна з формуванням ступеневого збільшення напруги живлення на лабораторній установці, які підтвердили можливість збільшення моменту і прискорення двигуна під час пуску.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, частотно-регульований електропривод, резонансна вібраційна машина, пусковий режим, резонансна зона, стрибкоподібне збільшення напруги.

**O. P. CHORNYI, V. YU. NOZHENKO, V. K. TYTIUK, O. K. DANILEYKO**

## **STUDY OF STARTING A FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE OF ABOVE RESONANCE VIBRATION MACHINE**

The features of starting the electric drive of vibrating machines with unbalanced vibration exciters operating in the resonant mode are considered. Currently, over-resonant vibration machines use unregulated asynchronous motors of high power, which is necessary for guaranteed passage of the resonance zone during start-up. The main reason for the possible “jamming” of the rotors of the drive motors of vibrating machines is a sharp increase in the vibration moment in the resonance zone. Overstated installed power of the drive motor is a necessary condition for exceeding the turning moment of the engine over the moment of resistance of the vibrating machine when passing through the resonance zone. To reduce the installed power of the electric drive of a resonance vibrating machine, it is proposed to use a frequency-controlled electric drive with a special law of frequency control, which ensures guaranteed overcoming of the resonance zone. To increase the torque of the drive motors during start-up, the use of the linear law of frequency control and an additional increase in the supply voltage for the period of passage of the resonance zone of the vibrator are proposed. In the work, the laws of frequency control are studied with increasing supply voltage in the form of a step and in the form of an impulse when passing through the resonance zone. Using mathematical modeling, studies were conducted of the frequency start of asynchronous motors of the off-resonant vibration platform, which is used to compact concrete mixtures. It is shown that an increase in voltage in the form of a step provides a decrease in losses in an induction motor and during start-up as compared to an increase in voltage in the form of a pulse. Experimental studies of the frequency start of an induction motor with the formation of a stepwise increase in the supply voltage.

**Keywords:** induction motor, frequency-controlled electric drive, above resonance vibration machine, starting mode, resonance zone, voltage jump.

**Введение.** В настоящее время вибрационные машины (ВМ) и технологии нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. В частности, для уплотнения бетонных смесей, транспортирования сыпного груза, дробления железобетонных плит и ферросплавов, а также для выполнения других технологических операций на ибольшее распространение получили ВМ с дебалансными вибровозбудителями, работающие в зарезонансном режиме [1–3]. Указанный вид ВМ характеризуется относительной простотой оборудования, достаточно стабильной его работой при изменении нагрузки в технологическом режиме. Однако, в процессе пуска ВМ при прохождении резонансной зоны возникают интенсивные колебания рабочего органа ВМ, которые сопровождаются существенными динамическими нагрузками на конструкционные элементы и опоры ВМ, роторы приводных двигателей и приводят к поломкам упругих элементов, быстрому выходу из строя оборудования. С целью снижения проявления указанных недостатков при преодолении резонансной зоны к ВМ применяют нерегулируемый электропривод (ЭП) с завышенной в 2÷5 раз мощностью приводных двигателей, которые в установившемся режиме работают с существенной недогрузкой. Это, в свою очередь, приводит к нерациональному использованию электрической энергии, а также ограничению возможностей управления ВМ при выполнении технологических операций [1–3]. Таким образом, на данный момент решение проблемы преодоления резонансной зоны в процессе пуска является своевременной и важной задачей.

**Анализ состояния вопроса.** Решением проблемы пуска зарезонансных ВМ занимались многие учёные, что привело к формированию способов уменьшения резонансных колебаний ВМ, к которым относятся [1, 2, 4–6]: использование форсированного пуска с помощью конденсаторов, последовательно включаемых с обмотками статора двигателя, применение раздельного (поочередного) пуска двигателей ВМ применение управляемых динамических гасителей колебаний, использование вибровозбудителей с автоматическим или вручную регулируемым статическим моментом дебалансов и др. Однако вышеперечисленные способы имеют ряд недостатков и не нашли широкого применения на практике. Кроме того, данные способы не решают проблему использования приводных двигателей к зарезонансным ВМ незавышенной мощности.

Решение проблемы пуска ВМ с помощью использования систем регулируемого ЭП некоторые учёные считают экономически нецелесообразной, если применять её только для преодоления резонансной зоны. Но основной задачей использования регулируемого ЭП к зарезонансным ВМ должно быть не только преодоление резонанса без «застывания», а и обеспечение увеличения величины момента двигателя над вибромоментом во время прохождения резонансной зоны при использовании двигателей мощностью, необходимой для работы в установившемся технологическом режиме.

Это позволит повысить КПД и коэффициент мощности двигателей, снизить потребление электрической энергии, изменять параметры колебаний во время выполнения технологического процесса, увеличить срок службы оборудования.

**Цель работы.** Исследование и анализ преодоления резонансной зоны в процессе пуска зарезонансной вибрационной машины при использовании частотно-регулируемого электропривода.

**Формирования управляющих воздействий частотного пуска вибрационной машины.**

В [7] указано, что при использовании частотно-регулируемого ЭП к зарезонансным ВМ целесообразно применять линейный закон частотного управления с постоянным отношением напряжения к частоте

$$\frac{U}{f} = \text{const},$$

поскольку этот закон обеспечивает приемлемые токовые и механические нагрузки, по сравнению с другими законами. К тому же, на основании исследований, приведенных в [7, 8] для гарантированного преодоления резонансной зоны необходимо увеличение момента асинхронных двигателей (АД) во время преодоления резонансной зоны, которое целесообразно выполнять скачкообразным увеличением напряжения питания.

Самая простая реализация скачкообразного увеличения напряжения питания во время подхода к резонансной зоне может быть выполнена в двух вариантах: если напряжение имеет ступенчатый вид; если напряжение имеет вид импульса.

Для формирования дополнительных управляющих пусковых воздействий необходимо знать параметры ВМ и приводных двигателей: резонансную частоту, максимум вибрационного момента, параметры АД, его перегрузочную способность по току и моменту. Следует отметить, что сравнивая частоту питания АД с заданной резонансной частотой ВМ, можно сделать вывод, что значение частоты питания АД, равное резонансной частоте ВМ, наступает раньше, чем происходит резонанс в механической части ВМ. Поэтому скачкообразное увеличение напряжения можно осуществлять в момент равенства частоты питания АД и заданной резонансной частоты ВМ.

*Первый вариант – напряжение питания имеет ступенчатый вид.*

В этом случае формирование напряжения и частоты питания АД ВМ в процессе пуска и во время преодоления резонансной зоны иллюстрируется рисунком 1 [7].

В начальный момент времени пуск вибросистемы осуществляется с законом частотного управления  $U/f = \omega_1$  (участок *ab*, рис. 1). При этом время развёртки частоты должно быть рассчитано, как предложено в [8, 9], поскольку для разных типов двигателей и разной нагрузки эта величина может изменяться. Если частота питания АД будет равняться резонансной частоте ВМ ( $2\pi f_d = \omega_r$ ), то будет осуществляться увеличение напряжения на величину  $\Delta U$  (рис. 1).

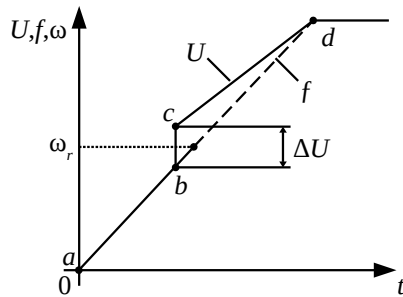


Рис. 1. Принцип формирования напряжения и частоты питания АД в процессе пуска во время преодоления резонансной зоны в ступенчатом виде

В этом случае отношение напряжения к частоте при прохождении резонансной зоны отличается от  $\frac{U}{f} = \gamma_1$  и равняется  $\frac{U + \Delta U}{f} = \gamma_2$  (участок  $bc$ , рис. 1).

Величину  $\Delta U$  следует выбирать такой, чтобы выполнялось условие  $I_1 = k_i \cdot I_{n1}$ , где  $I_1$  – текущее значение тока статора;  $k_i$  – перегрузочная способность АД по току;  $I_{n1}$  – номинальный ток статора АД.

После преодоления резонансной зоны (участок  $cd$ , рис. 1) напряжение и частота изменяются с отношением  $U/f = \gamma_3$ . В точке  $d$  АД выходит в установившийся режим.

Закон изменения напряжения во времени при пуске в этом варианте имеет вид [7]:

$$U_z = \begin{cases} \frac{U_n}{t_{r,m}} t, & \text{если } t \leq t_{on}; \\ \frac{U_n - \Delta U}{t_{r,m}} t + \Delta U, & \text{если } t_{r,m} > t > t_{on}; \\ U_n, & \text{если } t \geq t_{r,m}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_n$  – номинальное значение напряжения питания;  $t_{r,m}$  – время развёртки частоты;

$t$  – текущее значение времени;

$t_{on}$  – время, когда происходит скачкообразное увеличение напряжения;

$\Delta U$  – значение напряжения, на которое происходит его скачкообразное увеличение.

Второй вариант – напряжение питания имеет вид импульса.

В этом случае формирование напряжения и частоты питания АД ВМ в процессе пуска и во время преодоления резонансной зоны иллюстрируется рисунком 2.

Формирования напряжения питания в этом варианте на участке  $a'b'c'$  (рис. 2) выполняется идентично, как и в первом варианте на участке  $abc$  (рис. 1).

После скачкообразного увеличения напряжения питания на величину  $\Delta U$  осуществляется его дальнейший рост (участок  $c'd'$ , рис. 2). На этом участке рост  $U$  происходит параллельно  $f$  с отношением  $U/f = \gamma_3$ .

Одной из основных задач при формировании напряжения питания в виде импульса является определение момента отключения скачкообразного увеличения напряжения в процессе пуска.

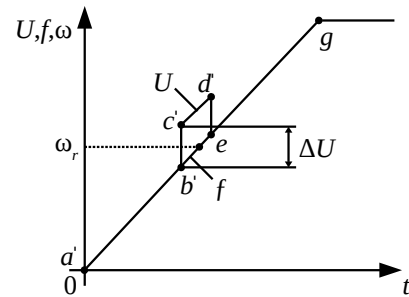


Рис. 2. Принцип формирования напряжения и частоты питания АД в процессе пуска во время преодоления резонансной зоны в виде импульса

Для этого необходимо, чтобы ВМ была оснащена датчиками тока и напряжения для измерения мощности. В схеме АД с ПЧ мощность может быть определена произведением напряжения на инверторе на ток в цепи постоянного тока:

$$P_d = U_i \cdot I_i, \quad (2)$$

где  $U_i$ ,  $I_i$  – текущее значение напряжения и тока на инверторе.

Затем определяется знак производной  $dP_d/dt$ , при  $\frac{dP_d}{dt} = 0$  или  $\frac{dP_d}{dt} < 0$  отключается скачкообразное увеличение напряжения, что указывает на преодоление резонансной зоны.

На рис. 2 отключения форсированного увеличения напряжения, то есть уменьшение его на величину  $\Delta U$ , происходит на участке  $d'e$ . Соответственно, дальше после преодоления резонансной зоны на участке  $eg$  (рис. 2) отношение напряжения к частоте снова равно  $U/f = \gamma_1$ , как и в начале пуска (участок  $a'b'$ , рис. 2). В точке  $g$  АД выходят в установившийся режим.

Закон изменения напряжения во времени при пуске при таком варианте имеет вид:

$$U_z = U + \Delta U, \quad (3)$$

$$\text{где } U_z = \begin{cases} \frac{U_n}{t_{r,m}} t, & \text{если } t_{on} > t > 0; \\ \frac{U_n + \Delta U}{t_{r,m}} t, & \text{если } t_{off} > t \geq t_{on}; \\ \frac{U_n}{t_{r,m}} t, & \text{если } t_{r,m} > t \geq t_{off}; \\ U_n, & \text{если } t \geq t_{r,m}. \end{cases}$$

$t_{off}$  – время, когда происходит отключение скачкообразного увеличения напряжения.

**Результаты математического моделирования формирования управляющих воздействий частотного пуска вибрационной машины.** Для подтверждения теоретических положений по формированию напряжения питания в процессе частотного пуска АД ВМ, а именно во время преодоления резонансной зоны, было проведено математическое моделирование пусковых режимов АД во время линейного изменения напряжения питания с  $t_{r,m}$  и скачкообразного увеличения.

В качестве резонансной ВМ при математическом моделировании рассматривалась вибрационная площадка блочной конструкции с двухвальными дебалансными вибровозбудителями [1, 3], которая используется для уплотнения бетонных смесей в форме. Математическое описание вибрационной площадки выполнялось в соответствии с [10] с конструктивными параметрами: полная приведенная масса колеблющихся частей ВМ с формой и бетонной смесью  $m_{pl} = 11000$  кг; коэффициент жесткости опор ВМ  $c_0 = 1,268 \cdot 10^8$  Н/м; коэффициент демпфирования  $b_0 = 30600$  Нс/м; расстояние дебаланса от оси вращения  $r = 0,1$  м; масса дебаланса  $m_0 = 22$  кг. Математическая модель АД была построена в трехфазной системе координат [11, 12].

Для такой вибрационной площадки применяются два нерегулируемые АД серии 4A180M4 мощностью 30 кВт каждый. При использовании частотно-регулируемого ЭП приводные АД были заменены на АД мощностью, необходимой для работы вибрационной площадки в установившемся технологическом режиме, а именно на АД серии 4A132M4 со следующими паспортными данными [11]:  $P_n = 11$  кВт;  $n_0 = 1500$  об/мин;  $\lambda_p = 2,2$ ;  $\lambda_k = 3,0$ ;  $s_n = 2,8$  %;  $s_k = 19,5$  %;  $k_i = 7,5$ ;  $\eta = 87,5$  %;  $J_d = 0,04$  кг·м<sup>2</sup>.

Исследование частотного пуска проводилось для трёх случаев: при линейном законе частотного управления с временем развёртки частоты 1,2683 с и при скачкообразном увеличении напряжения питания согласно рис. 3.

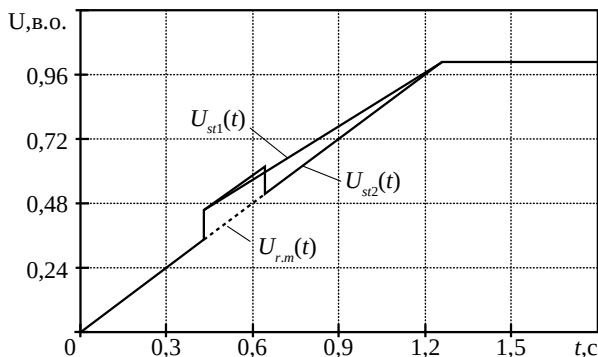


Рис. 3. Кривые напряжения питания асинхронного двигателя во время его увеличения в ступенчатом виде и в виде импульса

На рис. 3 обозначены кривые напряжения:  $U_{r.m}(t)$  – при линейном увеличении напряжения с  $t_{r.m}$ ;  $U_{st1}(t)$  – при увеличении напряжения в ступенчатом виде;  $U_{st2}(t)$  – при увеличении напряжения в виде импульса.

Увеличение напряжения в ступенчатом виде и в виде импульса выполнялось, когда значение частоты питания АД равнялось резонансной частоте, а именно  $53,68$  с<sup>-1</sup>, на 11 %.

Формирования задания частотного пуска идентичное для обоих АД ВМ, поэтому исследование пусковых режимов ЭП ВМ проводилось на одном из двух АД мощностью 11 кВт.

Результаты математического моделирования частотного пуска ЭП вибрационной площадки приведены на рис. 4, 5, где индексы обозначений кривых угловой скорости АД и момента соответствуют индексам обозначений кривых формирования напряжения питания (рис. 3).

Анализ кривых момента АД, приведенных на рис. 4, показал, что подача скачком напряжения питания в процессе пуска позволяет увеличить момент двигателя на 77 Нм и 81 Нм при преодолении резонансной зоны по сравнению со случаем, когда частотный пуск осуществляется по линейному закону с  $t_{r.m}$ .

Из кривых угловой скорости вращения АД  $\omega_{st1}(t)$ ,  $\omega_{st2}(t)$ , видно (рис. 5), что при формировании напряжения, согласно кривым  $U_{st1}(t)$ ,  $U_{st2}(t)$  (рис. 3), увеличение момента двигателя позволяет полностью избежать «застывания» роторов приводных АД и уменьшить время запуска АД примерно на 0,1 с, по сравнению с  $\omega_{r.m}(t)$ .

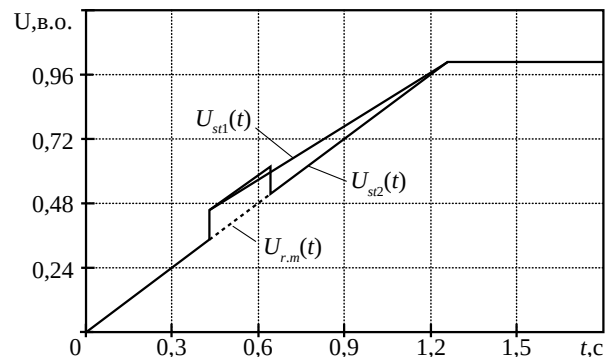


Рис. 4. Кривые момента АД ВМ при увеличении напряжения питания в ступенчатом виде и в виде импульса

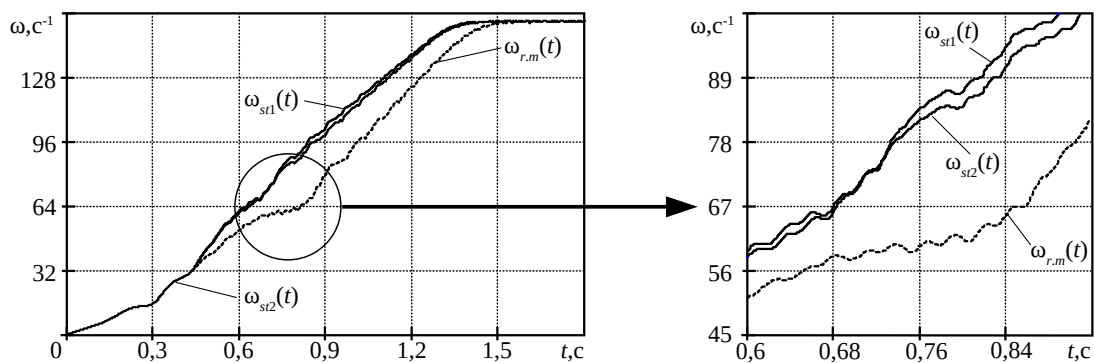


Рис. 5. Кривые угловой скорости вращения АД ВМ при увеличении напряжения питания в ступенчатом виде и в виде импульса

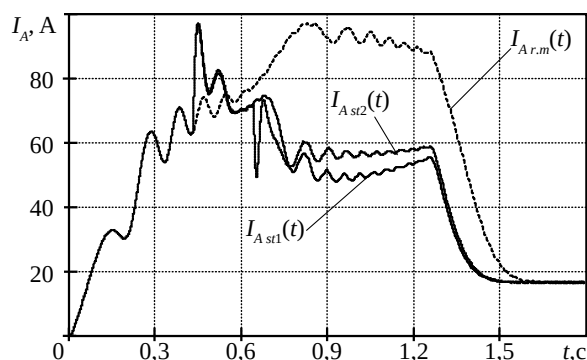


Рис. 6. Кривые тока статора фазы А АД ВМ при увеличении напряжения в ступенчатом виде и в виде импульса

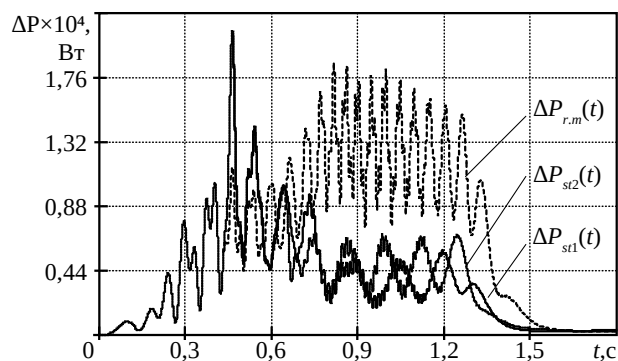


Рис. 7. Кривые потерь в АД при увеличении напряжения в ступенчатом виде и в виде импульса

Для определения наиболее целесообразного увеличения напряжения питания во время преодоления резонансной зоны в процессе пуска АД построены кривые тока статора фазы А АД (рис. 6) и кривые потерь в АД (рис. 7) в соответствии с выражением:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} = \int_0^{t_p} (3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2) dt, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{m1}, \Delta P_{m2}$  – потери в меди в статоре и роторе АД;  $t_p$  – время пуска АД.

В табл. 1 для сравнения приведены значения потерь в статоре АД ВМ, роторе и суммарных потерь при частотном пуске в случае формирования напряжения питания согласно рис. 3. Из таблицы видно, что в случае изменения напряжения питания в согласовании с кривой  $U_{st1}(t)$  (рис. 3) значение суммарных потерь минимальное по сравнению с другими случаями.

Таким образом, анализ проведённых исследований подтверждает, что наиболее целесообразно увеличивать напряжение питания в процессе частотного пуска АД ВМ в ступенчатом виде согласно кривой

Таблица 1 – Значение потерь в АД при частотном пуске при разных вариантах формирования напряжения питания

Формирование напряжения питания	Потери в статоре АД, кВт	Потери в роторе АД, кВт	Суммарные потери в АД, кВт
$U_{r.m.}(t)$	7,355	4,46	11,815
$U_{st1}(t)$	3,968	2,487	6,455
$U_{st2}(t)$	4,175	2,563	6,738

$U_{st1}(t)$  (рис. 3), поскольку такое увеличение проще в реализации и обеспечивает меньшее значение потерь в АД по сравнению с другими случаями.

**Экспериментальные исследования.** Проверка полученных результатов формирования частотного пуска с помощью математического моделирования была проведена на экспериментальной лабораторной установке, состоящей из АД с короткозамкнутым ротором серии АИРМ63А2У2 ( $P_n = 0,37$  кВт;  $n_0 = 3000$  об/мин), преобразователя частоты фирмы АВВ, шунтов токовых внутренних для измерения тока, цифровой системы регистрации и визуализации электрических сигналов «Визир-3» [7].

Формирования задания частотного пуска АД выполнялось в соответствии с кривыми, приведенными на рис. 1. При настройке параметров преобразователя частоты время развёртки частоты задавался 5 с, на 1,8 с выполнялось ступенчатое увеличение напряжения питания на 11 %.

При проведении экспериментальных исследований пуска фиксировались параметры тока фаз статора АД с помощью шунтов, которые включены в цепи питания «преобразователь частоты-асинхронный двигатель». Регистрация и визуализация измеренных сигналов тока статора асинхронного двигателя выполнялась с помощью регистратора электрических сигналов «Визир-3», который позволяет записать измеренные сигналы в текстовый файл. Для дальнейшего анализа полученных результатов исследований текстовые файлы измеренных сигналов отображаются с помощью программных продуктов для математических и инженерных расчётов на персональном компьютере.

Численный анализ полученных сигналов напряжения питания и тока статора фазы А АД почти невозможен, потому что они засорены высокочастотными помехами, которые возникают из-за формирования преобразователем ШИМ-напряжения с частотой модуляции 8 кГц. Для расчёта момента АД была проведена фильтрация сигналов напряжения и тока с помощью скользящего среднего с шириной окна 7.

На рис. 8, 9 приведены сигналы напряжения питания и тока статора фазы А АД после фильтрации. Форма напряжения питания и тока статора фазы А АД на периоде после фильтрации выглядит, как показано на рис. 10, 11.

Для воспроизведения электромагнитного момента по измеренным сигналам тока и напряжения использовалось уравнение электрического равновесия:

$$\frac{d\psi}{dt} = U - IR, \quad (5)$$

где  $U$  – напряжение;  $I$  – ток;  $R$  – сопротивление.

С помощью численного интегрирования потоко-сцепления было определено потоко-сцепления фазы, используя формулу Эйлера:

$$\psi_{j+1} = \psi_j + h(U_j - I_j R), \quad (6)$$

где  $h = 0,00005$  – шаг интегрирования, равный времени дискретизации при измерении сигналов тока и напряжения питания.

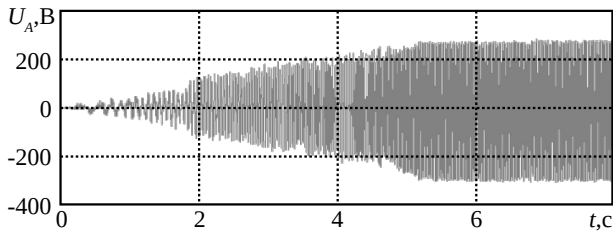


Рис. 8. Временная зависимость напряжения питания фазы А асинхронного двигателя

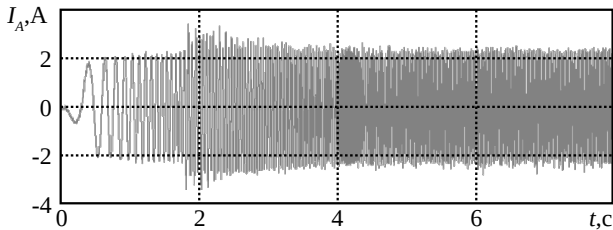


Рис. 9. Временная зависимость тока статора фазы А асинхронного двигателя

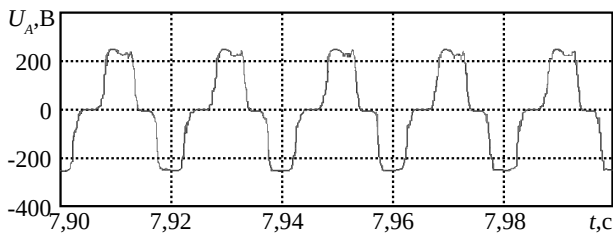


Рис. 10. Временная зависимость напряжения питания фазы А асинхронного двигателя на периоде

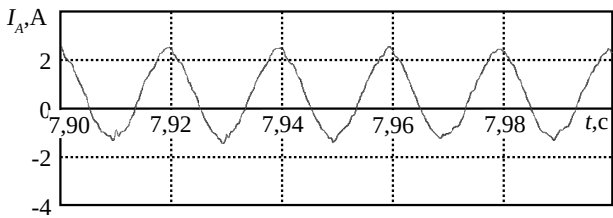


Рис. 11. Временная зависимость тока статора фазы А асинхронного двигателя на периоде

Такая процедура выполнялась для всех фаз двигателя. Электромагнитный момент определялся согласно выражения:

$$M_{em} = 2 \frac{\sqrt{3}}{3} [(\Psi_A - \Psi_B) i_C + (\Psi_B - \Psi_C) i_A + (\Psi_C - \Psi_A) i_B], \quad (7)$$

где  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$  – полные потокоцепления трёх фаз статора А, В, С;

$i_A, i_B, i_C$  – токи трёх фаз статора А, В, С.

Используя уравнения движения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_s \quad (8)$$

где  $M_s$  – момент сопротивления, и численно интегрируя его с применением формулы Эйлера, определена угловая скорость вращения ротора АД.

Полученные временные зависимости момента и угловой скорости вращения АД показаны на рис. 12 серым цветом.

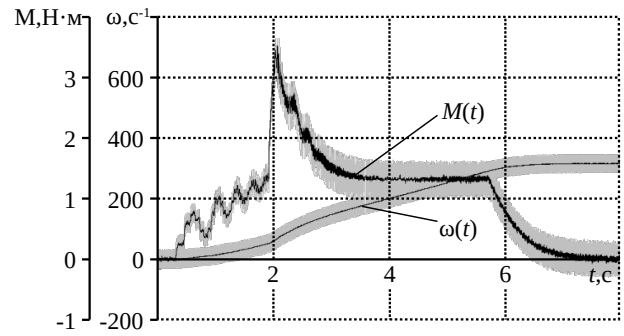


Рис. 12. Временные зависимости момента и угловой скорости вращения АД

Из-за зашумленности интегрирующихся сигналов момент и угловая скорость вращения АД имеют вид, который сложно анализировать. Поэтому было выполнено частичное удаление шума, используя скользящее среднее. Полученные зависимости показаны черной сплошной линией (рис. 12).

Полученные результаты экспериментальных исследований показали, что сформированный скачок напряжения питания позволяет увеличить момент и ускорение АД во время пуска и подтверждает адекватность теоретических результатов.

**Выводы.** Для прохождения резонансной зоны в процессе пуска вибрационной машины предложено увеличение момента приводных двигателей за счёт скачкообразного изменения напряжения питания.

Проведены исследования частотного пуска резонансной вибрационной машины при замене приводных двигателей мощностью в три раза меньшей исходной для двух вариантов скачкообразного увеличения напряжения питания, когда напряжение имеет ступенчатый вид и вид импульса. Анализ полученных результатов показал, что наиболее целесообразным является увеличение напряжения питания в ступенчатом виде, поскольку в таком случае значение суммарных потерь в АД меньше по сравнению со вторым вариантом. Ступенчатое увеличение напряжения питания АД в процессе пуска обеспечивает превышение динамического момента АД над вибрационным моментом в резонансной зоне и позволяет полностью устранить «застывание» роторов приводных двигателей резонансной ВМ, уменьшить время пуска.

С помощью лабораторной установки проведены экспериментальные исследования формирования увеличения напряжения питания в ступенчатом виде при частотном пуске АД, которые подтвердили возможность увеличения момента двигателя в процессе пуска и применения частотно-регулируемого электропривода к резонансным вибрационным машинам для преодоления резонансной зоны без «застывания».

#### Список литературы

1. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т 4: Вибрационные машины и процессы / Под ред. Э.Э. Лавендела. Москва: Машиностроение, 1981. 509 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. Москва: Наука, 1971. 896 с.
3. Сергеев В.П. Строительные машины и оборудование: учебник для вузов. Москва: Высшая школа, 1987. 376 с.

4. Дмитриев В.Н., Гаврилов Е.Н. Переходные процессы резонансных вибрационных машин. *Электротехнические комплексы и системы управления*. Воронеж: ЗАО «Воронежский инновационно-технологический центр». 2011, №4. С.52 – 55.
5. Ярошевич Н.П., Забродец И.П., Силивонюк А.В., Ярошевич Т.С. Динамика пуска вибрационных машин с дебалансным приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: Вінницький національний аграрний університет. 2015, Вип. 4 (80). С. 113 – 120.
6. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Ярошевич Н.П. Способ пуска вибрационной машины с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. Патент RU, № 2516262, 2012.
7. Nozhenko V., Rodkin D., Bohatyrov K. Control of passing the resonance zone during start-up of above resonance vibration machines. *Proceedings of the International conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 23-25 September, 2019. pp. 146 – 149.
8. Ноженко В.Ю., Чорний О.П., Родькин Д.И., Ченчевой В.В. Керування пуском резонансної вібраційної машини з дебалансними вібробудувачами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, Вип. 27 (1249). С. 384 – 387.
9. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. URL: <http://www.toroid.ru/sandlerAS2.html>. (дата обращения 15.01.2020).
10. Ноженко В.Ю., Родькин Д.И., Ченчевой В.В. Особенности пуска резонансных дебалансных машин с дебалансными вибровозбудителями. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015, Вип. 12 (1121). С. 218 – 223.
11. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Москва: Высшая школа, 2001. 372 с.
12. Чорний О.П., Толочко О.І., Титюк В.К., Родькин Д.И., Чекавський Г.С. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2016. 299 с.
5. YArashevich N.P., Zabrodec' I.P., Silivonyuk A.V., YArashevich T.S. *Dinamika puska vibracionnyh mashin s debalansnym privodom* [Dynamics start vibrating machines with unbalanced drive]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiiakh* [Vibrations in engineering and technology]. Vinnytsia: Vinnytskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet. 2015, Vyp. 4(80). pp. 113 – 120.
6. Blekhaman I.I., Vajsberg L.A., Vasil'kov V.B., YArashevich N.P. *Sposob puska vibratsionnoy mashiny s dvumya samosinkhroniziruyushchimisya debalansnymi vibrovobuditeliymi* [The method of starting a vibration machine with two self-synchronizing unbalanced vibration exciters]. Patent RU, № 2516262, 2012.
7. Nozhenko V., Rodkin D., Bohatyrov K. Control of passing the resonance zone during start-up of above resonance vibration machines. *Proceedings of the International conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 23-25 September, 2019. pp. 146 – 149.
8. Nozhenko V.Yu., Chornyi O.P., Rodkin D.Y., Chencheyov V.V. Keruvannya puskom zarezonansnoyi vibratsiynoyi mashyny z debalansnymi vibrobudzhuvachamy [Controlling the start of a resonant vibration machine with unbalance exciters]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, Vyp. 27 (1249). pp. 384 – 387.
9. Sandler A.S., Sarbatov R.S. *Avtomaticheskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* [Automatic frequency control of induction motors]. URL: <http://www.toroid.ru/sandlerAS2.html>. (accessed 15.01.2020).
10. Nozhenko V., Rodkin D., Chencheyov V. Osobennosti puska zarezonansnykh debalansnykh mashin s debalansnymi vibrovobuditeliymi [Features superresonance start vibrating machines with debalanced vibration exciters]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, Vyp. 12( 1121). pp. 218 – 223.
11. Kopylov I.P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moskva: Vysshaya shkola, 2001. 372 p.
12. Chornyi O.P., Tolochko O.I., Tytiuk V.K., Rodkin D.I., Chekavskiy H.S. *Matematychni modeli ta osoblyvosti chyselnykh rozrakhunkiv dynamiky elektropryvodiv z asinkhronnymi dyvuhunamy: monohrafiia* [Mathematical models and features of numerical calculations of the dynamics of drives with induction motors: monograph]. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. Publ., 2016. 299 p.

## References (transliterated)

Посмунула 29.01.2020

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Чорний Олексій Петрович (Черный Алексей Петрович, Chornyi Oleksii Petrovych)** – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, директор інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8270-3284>; e-mail: ochornyi@ukr.net

**Ноженко Вікторія Юріївна (Ноженко Виктория Юрьевна, Nozhenko Viktoriia Yuriivna)** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, асистент кафедри систем енергоспоживання та енергетичного менеджменту; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8270-3284>; e-mail: ochornyi@ukr.net

**Титюк Валерій Костянтинович (Тытук Валерий Константинович, Tytiuk Valerii Kostiantynovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, доцент кафедри електромеханіки; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1077-3288>; e-mail: dinalt2006@gmail.com

**Данилейко Олег Костянтинович (Данилейко Олег Константинович, Danileiko Oleg Kostiantynovych)** – Криворізький національний університет, старший викладач кафедри електромеханіки; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-8271>; e-mail: adanil49g@gmail.com