

УДК 621.313

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Савошко М.В., Наварич К.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Сизиков С. В.

В наши дни, автоматизированные системы управления чаще всего используют машины двойного питания или МДП. Это дает существенно повысить не только технико-экономические показатели различных технологических установок, но и электроприводов с периодическим законом движения. Такие возможности обусловлены тем, что МДП, как электромеханический преобразователь энергии, характеризуется высокими энергетическими показателями, а также обладает хорошей управляемостью, что обеспечивает большой пусковой момент. Универсальность МДП, вызванная различным количеством витков обмоток статора и ротора, а также их индуктивных сопротивлений, заключается в возможности получить основные разновидности колебательных машин переменного тока:

- синхронную машину с постоянной амплитудой скорости в рабочем режиме, имеющую большой пусковой момент и плавную ресинхронизацию;
- асинхронную машину с мягкой механической характеристикой и большим пусковым моментом;
- шаговый силовой двигатель, в котором из-за большого пускового момента разгон машины до синхронной скорости можно достичь за время, соответствующее одному периоду намагничивающей силы поля статора без потери шага.

Изменять функции регулирования на обмотках вторичного элемента исполнительного двигателя по заданному алгоритму предоставляет возможность осуществлять в ней автоматическое регулирование перегрузочного момента в квазиустановившемся синхронном режиме при различных коэффициентах загрузки, в том числе и при нагрузке большей номинальной.

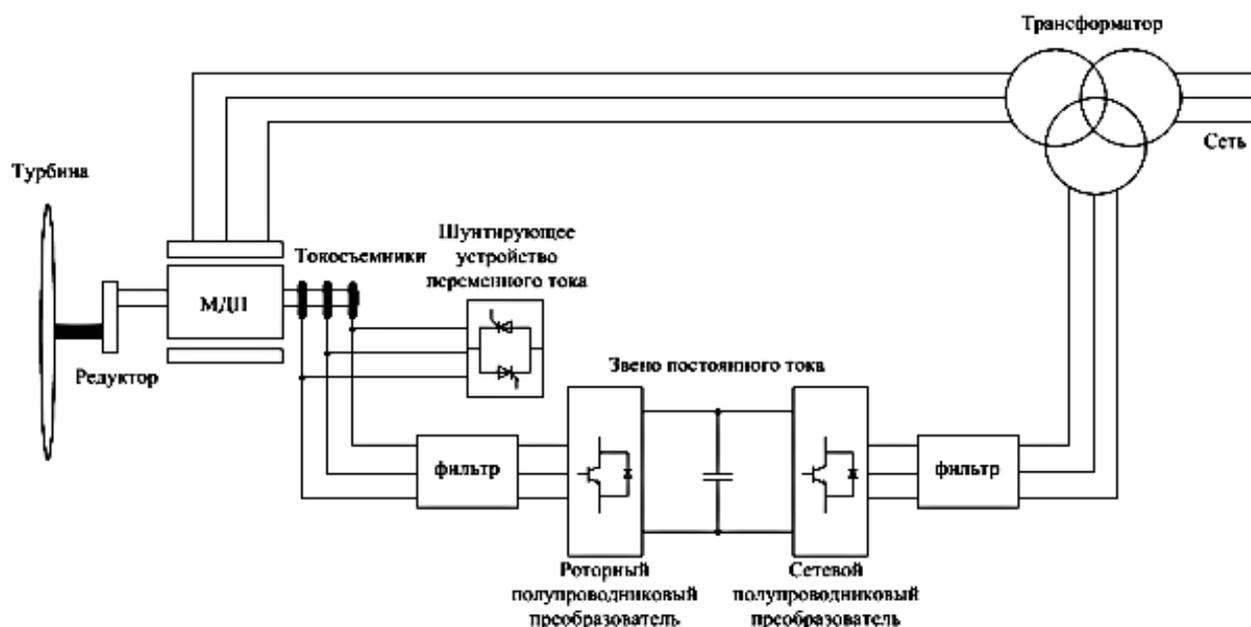


Рисунок 1 – Структура машины двойного питания (МДП)

Рассмотрим, что такое машина двойного питания или МДП. Машина двойного питания – конструктивно это асинхронная машина с фазным ротором, имеющая раздельное питание обмоток статора и ротора, при этом сумма (разность) частот тока питания кратна частоте вращения вала. Но в основе принципа работы МДП заключается схожесть работы синхронной машины, так как токи в роторе получаются не за счёт скольжения последнего относительно поля статора, а за счёт подачи тока от внешнего источника. Машины двойного питания имеют два режима работы: двигательный режим и генераторный режим. Рассмотрим преимущества машин двойного питания:

- возможность работы с частотой вращения вала 6000 об/мин при подключении к промышленной сети и возможность увеличить мощность в 2 раза при тех же размерах, значениях магнитного потока и крутящего момента;
- возможность управлять двигателями статических преобразователей половинной мощности;
- возможность увеличения напряжения в генераторе благодаря использованию последовательного соединения обмоток статора и ротора.
- Но такие машины имеют ряд недостатков:
- возможность выпадения из синхронизма из-за возникновения "качание" ротора, похожее на "качание" у обычных синхронных машин;
- наличие скользящих контактов для передачи тока на ротор.
- мощность, подаваемая на ротор примерно пропорциональна частоте питающего тока.

Машины двойного питания могут применяться в турбогенераторах, ветрогенераторах, двигателях, преобразователей частот и так далее.

В таблице представлены характеристики электродвигателей колебательного движения, с учётом их названия, фирм и выпускаемых ими установок. Но электродвигатели, применение которых нецелесообразно, такие как терма и пневмоэлектрические, химико-тепловые и так далее в таблицу не включены.

Таблица 1 – Характеристики электродвигателей колебательного движения

Типы электродвигателей колебательного движения	Диапазон рабочих частот, Гц	Макс. амплитуда колебаний, мм	Максимальное ускорение, м/с ²	Коэффициент гармоник, %	Вид колебаний	Типы промышленных установок
Механические (кривошипно-шатунные, эксцентрикные)	0,1-2,5 12-200	5-500 0,05-1	125 4-80	– –	линейные линейные	ВУС 500/200; ВМС-3; УВ70-200 (Россия); ST-30/3; ST-80/5 (Германия); EX-30; UB-2000A (Япония); RV-15-30; VMI-2NB (США), ENAR (Испания)
Гидравлические (объёмного, проточного действия)	1-300 0-500	5 10	300 1000	20 20	линейные линейные	УГВ10/150; ВСГ-1; ВС-1; ВП-100 (Россия); 800; 10 (Лозаннаузен), ФРГ); P781; PB134 (Амстер, Швейцария)
Магнитомеханические	10-2500	0,05	2000	10	линейные	«Вибратор»
Электромагнитные	20-600 40-300	2 1,5	–	5 8	линейные линейные	ЭВМ-1 (Россия); «Виброфор» (Амстер, Швейцария)
Электродинамические	5-5000 20-10000	12,5 10,9	440 100	10 –	линейные линейные	ВЭДС-200А; ЭДВ-13; АГАТ-80; ВСВ-133 (Россия); V-1000B (В. Британ-Саваж, Великобритания); V-50MKI; VG-109MKI (Гудманс, Великобритания); LPM25 (Пай-Линг ЛТД, Англия; ассоциация «Линг Электроникс» США); VE3200; RF-0005; XL-1400 (Япония)
Электрогидравлические и магнитогидравлические	0,05-50 1-100	400 100	300 120	18 20	линейные линейные	ЭГВ-1-300; ЭГВ-20-200 (Россия); HS-1005; HS-1100 (ИМВ Лаб. КО., ЛТД, Япония); SEV63-100-16; SEV160-160-63 (Инова, Чехия); 205.31; 205.51; 208.11; 208.51 (МТС, США)
Электромашины на базе двигателей переменного тока	10 ⁴ -10 ⁵ 10 ⁴ -4.10 ⁵	10 ⁴ -5.10 ⁵ 10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁴ -10 ⁵ 5.10 ⁴ -10 ⁵	2 0,1	линейные угловые	–

Механические (кривошипно-шатунные, эксцентрикные) электродвигатели

Преобразование вращательного движения исполнительного двигателя осуществляют механические возбудители колебаний в механические прямолинейные или крутильные колебания. Но преобразование возможно и за счёт эксцентрика, или под действием центробежной силы, создаваемой двумя одинаково не уравновешенными валами, вращающихся в противоположных направлениях. Благодаря конструкции валов появляется возможность достижения закона движения подвижного элемента вибростенда к гармоническому.

Гидравлические (объёмного, проточного действия) электродвигатели

Работа гидравлических двигателей основана на циклическом реверсировании потока жидкости в грузовом цилиндре. Эффективность их работы зависит от способности механизма возвращать и рекуперировать энергию колеблющихся масс для создания последующего движения. Предельные возможности гидра-возбуждения, зависят от количества рабочей жидкости, участвующей в возбуждении, что не позволяет полностью использовать мощность привода на низких частотах (ед. Гц). Они обладают

большой грузоподъемностью и, в основном, предназначены для испытания строительных конструкций на сейсмостойкость.

Электрогидравлические и магнитогидравлические двигатели

Преимуществом таких двигателей являются:

- большой энергоемкости гидравлических исполнительных механизмов;
- высокая точность и быстродействие;
- достижение больших амплитуд колебаний на низких частотах.

Благодаря своей упругости жидкость в исполнительном механизме действует как пружина, что приводит к резонансу на частотах. На частотах выше резонансной усилие возбудителя колебаний уменьшается, ввиду возрастания расхода рабочей жидкости. Амплитуда виброрасмещения на частотах 200...500 Гц составляет доли мкм, а фазовые характеристики затрудняют точное автоматическое управление заданным режимом.

Магнитомеханические двигатели

Переменное усилие является функцией магнитной силы и изменения магнитного сопротивления магнитной системы в зависимости от скорости вращения ротора. Преимущества заключаются в постоянстве создаваемого переменного усилия независимо от частоты его колебаний, а так же простоте управления переменной силой во всем диапазоне рабочих частот, из-за изменения тока возбуждения электромагнита, и малом сопротивлении движению якоря. Форма колебаний магнитомеханических возбудителей близка к синусоидальной форме, и определяется видом зубцов ротора и вставок якоря. Но затруднение изменения частоты обусловлено моментом инерции вращающегося ротора.

Электромагнитные двигатели

Втягивание якоря дважды в воздушный зазор переменного тока обусловлено протеканием по обмоткам переменного тока в электромагнитном возбудителе колебаний. Следовательно, переменное усилие определяется произведением переменного тока на некоторый конструктивный коэффициент, зависящий от числа витков обмотки возбуждения и воздушного зазора между якорем и полюсом магнитной системы. Применяются электромагнитные возбудители колебаний преимущественно для возбуждения колебаний в резонансных вибростендах, которые используются в основном для калибровки виброизмерительной аппаратуры.

Электродинамические двигатели

Принцип работы электродинамического возбудителя механических колебаний основан на взаимодействии переменного тока с постоянным магнитным полем. Отличительными особенностями их является возможность простыми средствами производить регулирование по развиваемой силе, амплитуде перемещения, скорости или ускорению. Но данный класс двигателей плохо работает на частотах ниже 5 Гц.

Электродинамические двигатели

В электрострикционных и магнитоэстрикционных колебательных двигателях используются эффекты изменения размеров тел из соответствующих материалов под воздействием электрического (закон Липпмана) и магнитных (закон Джоуля) полей. Достоинством двигателей такого рода является простота

конструкции, однако недостатками электродинамических двигателей является малая амплитуда колебаний (10–5 ... 10–2 мм) и неспособность регулировать закон колебания.

Электромашинные двигатели на базе двигателей переменного тока

Анализ показывает, что применение большинства из двигателей в автоматизированных системах значительно ограничено. Это следует из наличия дополнительных звеньев преобразования движения, трудностей с конструированием механизма, обеспечивающего плавное изменение амплитуды колебаний рабочего стола в процессе испытаний без остановки установки, отсутствия возможности формирования регулируемых по частоте, амплитуде и форме колебаний, отличных от гармонических составляющих.

Формирование колебательного режима работы в МДП осуществляется за счет создания качающегося электромагнитного поля в воздушном зазоре двигателя.

Если выдвинуть предположение, о том, что магнитная система электрической машины ненасыщенная, следовательно, о характере изменения магнитного поля в воздушном зазоре можно предполагать по пространственному положению результирующего вектора потокосцепления.

При фазовой модуляции аналитические выражения обобщенных векторов фазных потокосцеплений обмоток статора *s* и ротора *r* при разночастотном питании симметричной в электрическом и магнитном отношении МДП имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_s &= \psi_s e^{j\varphi_s} \\ \bar{\psi}_r &= \psi_r e^{j\varphi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{где } \psi_s &= \psi_{ms} \sqrt{\sin^2(\omega_1 t + \alpha) + \cos^2(\omega_2 t + \beta)}; \\ \psi_r &= \psi_{mr} \sqrt{\sin^2(\omega_1 t + \alpha) + \cos^2(\omega_2 t + \beta)}; \\ \varphi_s &= \varphi_r = \arctg \frac{\sin(\omega_1 t + \alpha)}{\cos(\omega_2 t + \beta)} \end{aligned}$$

Здесь ψ_{ms}, ψ_{mr} – амплитудные значения фазных потокосцеплений обмоток электрической машины; $\omega_1, \omega_2, \alpha, \beta$ – круговые частоты и начальные фазы фазных потокосцеплений. Используя масштабный коэффициент $\mu = \psi_{mr} / \psi_{ms}$, перемещение пространственного результирующего вектора потокосцепления θ в воздушном зазоре относительно первичного элемента двигателя можно описать законом

$$\chi_0 = \arg[\psi_0] = \arctg \frac{\sin(\omega_1 t + \alpha)}{\cos(\omega_2 t + \beta)} \pm \arctg \frac{\mu \sin \chi}{1 + \mu \cos \chi}$$

где знак "+" соответствует согласному, следовательно "-" – встречному включению электромагнитных полей соответственно обмоток *s* и *r*; χ – закон движения подвижного элемента двигателя. Причем для двигателей углового

движения $\chi_0 = \phi_0$, а для двигателя прямолинейного движения $\chi_0 = \pi$. χ_0/τ , где χ_0 – линейная координата вектора ψ_0 ; τ – полюсное деление. Проанализировав выражение (1) следует, что в отличие, к примеру, от асинхронных машин, работающих в режиме вынужденных колебаний, в машинах двойного питания происходит дополнительная модуляция электромагнитного поля по фазе, за исключением случая идеального холостого хода, при условии $\mu = 1$

$$\chi_0 = 2 \arctg \frac{\sin(\omega_1 t + \alpha)}{\cos(\omega_2 t + \beta)}$$

Аналогичную модуляцию по амплитуде претерпевает и модуль пространственного результирующего вектора потокосцепления ψ_0 :

$$\psi_{m0} = \psi_s \sqrt{(1 + \mu \cdot \cos^2 \chi)^2 + \mu^2 \sin^2 \chi}$$

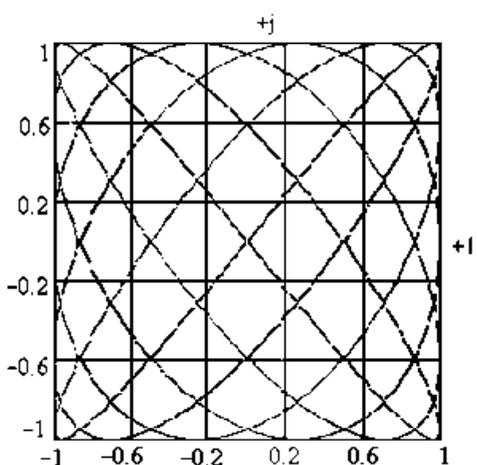


Рисунок 2 – Годограф результирующего вектора потокосцепления МДП и годографа асинхронного двигателя (АД)

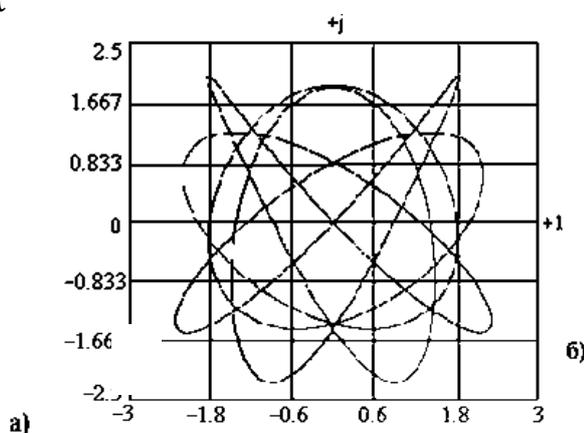


Рис. 1. Годографы векторов Ψ_0 при фазовой модуляции питающих напряжений (токов) а) АД и б) МДП; $\omega_1=10$, $\omega_2=9$, $\alpha=\beta=0$

В результате годограф результирующего вектора потокосцепления МДП существенно отличаются от годографа асинхронного двигателя АД. В качестве примера на рис. 1 представлены годографы результирующих векторов потокосцеплений для АД (а) и МДП (б) при учете первой гармоники закона движения подвижного элемента двигателя $\chi = \chi_m \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi]$, для $\chi_m = 1$, $\omega_1 = 10 \text{ c}^{-1}$, $\omega_2 = 9 \text{ c}^{-1}$, $\alpha = \beta = \phi = 0$. Так как закон движения подвижного элемента исполнительного двигателя по существу повторяет закон движения электромагнитного поля, то, согласно выражению (1), следует заключение о том что при всех прочих равных условиях работа МДП в режиме вынужденных колебаний характеризуется более высокими выходными параметрами, в качестве которых для систем с периодическим движением вала (штока) принято рассматривать: амплитуду координаты движения подвижного элемента двигателя или его усилия, скорость и ускорение. Наличие дополнительной модуляции колебательного электромагнитного поля МДП в зависимости от координаты подвижного элемента двигателя $\chi(t)$ оказывает существенное влияние на процессы энергообмена в электродвигателях колебательного

движения. Причем, чем больше амплитуда χ_m , тем сильнее искажается модуль пространственного результирующего вектора потокосцепления Ψ_{m0} (рис. 2), и тем сильнее наблюдаются высокочастотные пульсации в кривой скорости электромагнитного поля

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(\omega_1 + \omega_2) \cos(\Omega t + \alpha - \beta) + \Omega \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \alpha - \beta]}{\sin^2(\omega_1 t + \alpha) + \cos^2(\omega_2 t + \beta)} \right\} + \left[\omega \mu \frac{\mu + \cos \chi}{1 + 2\mu \cdot \cos \chi + \mu^2} \right]$$

где ω – скорость движения подвижного элемента двигателя.

Из этого следует существенное изменение как статических, так и динамических характеристик колебательной системы. Во-первых, это связано с тем, что при совершении колебательного движения исполнительный двигатель успевает работать в течение одного периода колебания в режимах электромагнитного тормоза "Т" ($\infty \geq s \geq 1$), двигателя "Д" ($1 \geq s \geq 0$) и генератора "Г" ($0 \geq s \geq -\infty$), и наличие дополнительных пульсаций скорости поля (ω) приводит к перераспределению временных интервалов этих режимов. Процессы внутреннего энергообмена между электрической машиной и сетью повторяются периодически с удвоенной частотой колебаний. В двигательном режиме электрическая машина, потребляя из сети активную мощность, запасает кинетическую и потенциальную энергии в инерционных и позиционных составляющих нагрузки, а в генераторном и тормозных – компенсирует запасенную в нагрузке энергию до момента полного возврата колебательной системы в исходное состояние. Как и для электромеханических систем однонаправленного движения, режим компенсации при колебательном движении может осуществляться с отдачей энергии в сеть (генераторный режим) или с потреблением энергии из сети (режим динамического торможения). Поэтому, естественным путем улучшения энергетических характеристик исполнительного двигателя видится в увеличении режима рекуперативного торможения. Во-вторых, наличие компенсирующей составляющей модуля пространственного результирующего вектора потокосцепления (2), вызванной наличием электромагнитной обратной связи по положению $\chi(t)$, позволяет формировать в МДП резонансный режим работы. Но, при разработке таких систем возникает задача синтеза параметров колебательного электродвигателя, обеспечивающего статическую устойчивость колебательного комплекса при заданных параметрах нагрузки и функций регулирования.

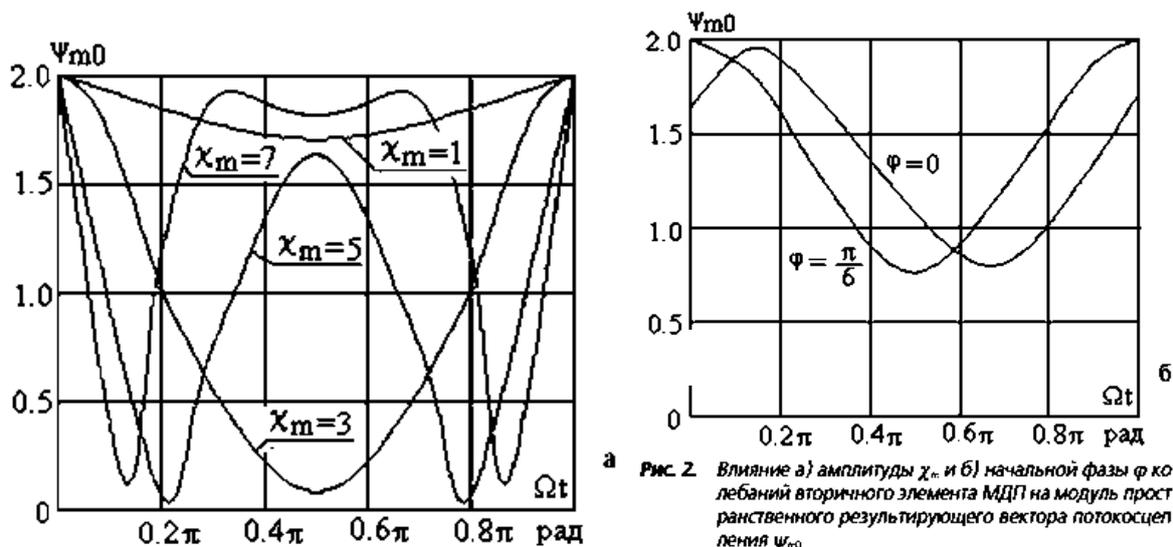


Рисунок 3 – Показания приборов

При рассмотрении существующих электродвигателей колебательного движения для создания современных колебательных комплексов, можно подметить целесообразность решения задачи путём использования управляемых машин переменного тока, в использовании как электрических машин серийного изготовления (асинхронные машины с фазным или короткозамкнутым ротором), так и специально спроектированных для работы в режиме вынужденных колебаний. Стоит учитывать тот факт, что в первом случае использование серийных машин предполагает дополнительные меры, направленные на доработку механических частей двигателя, однако во-втором – следует ожидать более высокие технико-экономические показатели, так как машина проектируется непосредственно для конкретно заданной установки, с учетом свойств всех остальных элементов, входящих в данный колебательный комплекс. Достоинствами в использовании МДП в режиме колебательного движения являются:

- хорошая управляемость электромеханических преобразователей энергии;
- совместимость со средствами вычислительной техники;
- высокой надежностью и низкой стоимостью.

Проанализировав современное состояние и перспективы развития без редукторных колебательных комплексов на базе электрических машин переменного тока, можно заключить, что тенденция создания таких машин, обладающих высокими динамическими и энергетическими характеристиками весьма высока. Применение с этой целью МДП позволяет существенно расширить потребный диапазон угловых (линейных) колебаний по развиваемому усилию, повысить энергетические показатели, получить новые функциональные возможности электропривода колебательного движения.

Литература

1. Аристов А. В. Вопросы исследования, разработки и практического внедрения электроприводов колебательного движения с машиной двойного питания // Современные

проблемы энергетики, электромеханики и электро-технологии. – Ч. 2. – Екатеринбург: Издательство УПИ, 1995. – С. 234–236.

2. Гладков С. Н. Электромеханические вибраторы. – М.: Машиностроение, 1966. – 83 с.

3. Захаров Ю. Е. Исследование гидравлических и электрогидравлических вибраторов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М.: МВТУ, 1974. – 41 с.

4. Соустин Б.П., Тестоедов Н.А., Рудометкин А.Г., Алькин А.В. Виброиспытания космических аппаратов. – Новосибирск: Наука, 2000. – 175 с.