

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

УДК 621.313

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЗМОВ

А.И. Каплин  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассмотрена эффективность регулирования частоты вращения электродвигателей и электромеханизмов, для которых требования к уровням вибрации заданы в виде уровней виброускорения в широком частотном диапазоне. Показано, что для ряда диапазонов частот регулирование может быть неэффективным. Установлена необходимость разработки научно-технического обеспечения при внедрении регулирования частоты вращения.*

**Ключевые слова:** регулирование частоты вращения, преобразователи частоты, снижение вибрации, электродвигатели, электромеханизмы.

Обычной целью применения электродвигателей (ЭД) с регулируемой частотой вращения является изменение режима работы исполнительного органа приводного электромеханизма (ЭМ). С этой целью широко использовались ЭД постоянного тока. Уже достаточно давно [1] ставился вопрос о применении асинхронных ЭД. Однако до 70 – 80-х годов прошлого столетия, когда появились тиристорные преобразователи частоты (ПЧ), асинхронные ЭД в приводах с регулированием частоты вращения не применялись.

В 80-х годах для некоторых ЭМ специального назначения были предприняты попытки использования асинхронного регулируемого привода как для изменения режима работы, так и для снижения виброактивности. С тех пор по настоящее время эти работы продолжаются с различной степенью интенсивности, и накопленный опыт позволяет оценить современное состояние эффективности этого направления.

Следует отметить, что эффективность применения регулирования частоты вращения для снижения вибрации существенным образом зависит от параметров вибрации, системы амортизации, конструкции ЭД и т. д. Настоящее исследование относится к упругоустанавливаемым асинхронным ЭД и электронасосам, в которых контролируется уровень виброускорения в диапазоне от 5 Гц до 10 кГц. Целью регулирования частоты вращения является обеспечение требований к вибрации во всем указанном диапазоне частот.

Источниками вибрации в электронасосах являются: – механическая неуравновешенность ротора двигателя и колеса насоса;

– подшипники качения или скольжения;  
– электромагнитные силы в двигателе;  
– гидродинамические силы, связанные с неоднородностью потока, кавитацией и вихревыми процессами в жидкости.

Согласно [2] зависимость указанных уровней основных составляющих вибрации от частоты вращения  $n$  можно представить следующим образом:

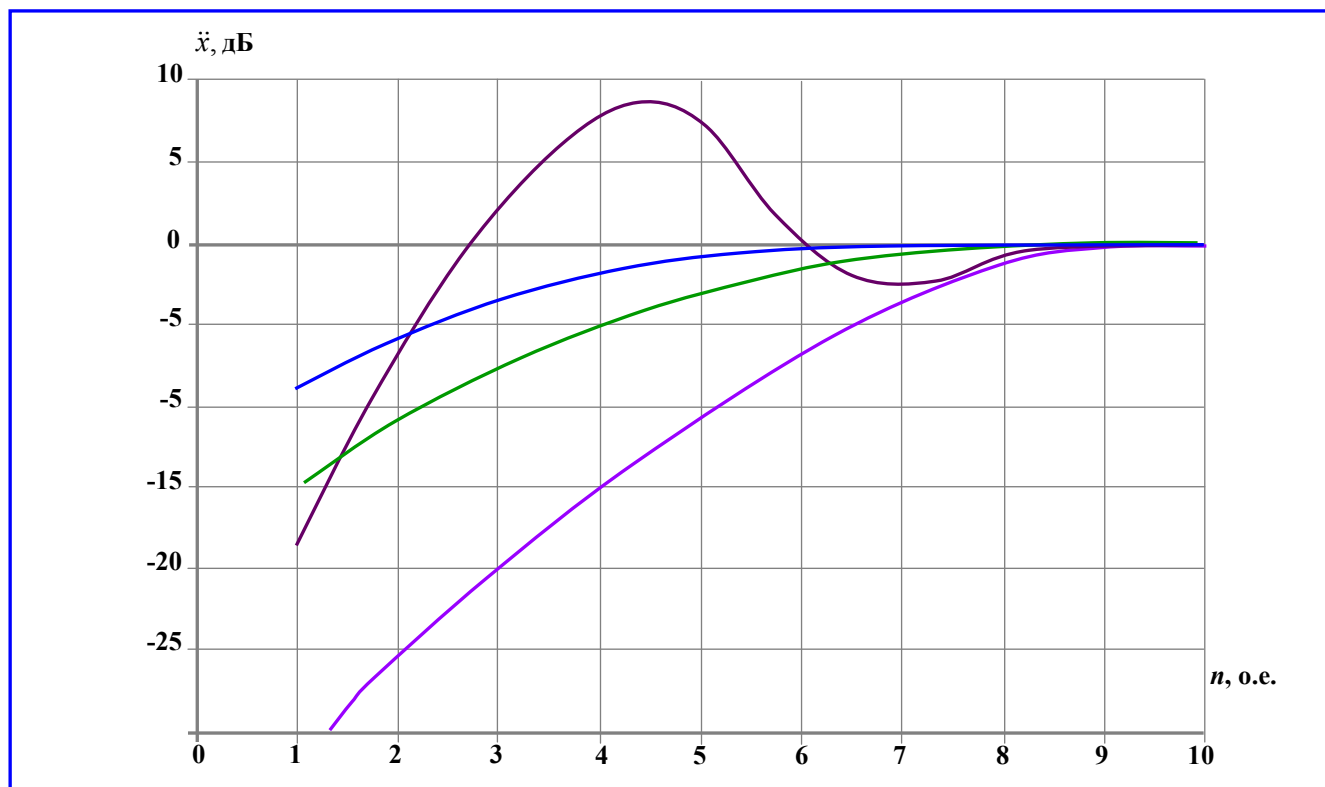
$$W = 10\alpha \lg n + \text{const, дБ}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент:

- для механической неуравновешенности  $\alpha = 3 - 4$ ;
- для подшипников  $\alpha = 2 - 3$ ;
- для электромагнитных сил  $\alpha = 4$ ;
- неоднородность потока  $\alpha = 4 - 6$ ;
- кавитация  $\alpha = 5 - 8$ ;
- вихревые процессы в жидкости  $\alpha = 6$ .

Из приведенного соотношения следует, что регулирование частоты вращения является эффективным способом снижения вибраций. Этот вывод справедлив в предположении о нерезонансном характере вибраций во всем диапазоне регулирования.

На практике, при достаточно широком диапазоне регулирования, ввиду значительного количества резонансных частот, которыми обладает механические системы ЭД и ЭМ, при отдельных частотах вращения эффективность снижения вибрации либо существенно ниже расчетной, либо вообще отрицательна.



**Рис. 1. Влияние регулирования частоты вращения:**  
 - -  $f_{вр}$ ; - -  $f_{вр} < f < 100$  Гц; - -  $150 < f < 1000$  Гц; - -  $f > 1000$  Гц

На рис. 1 представлены данные по эффективности влияния регулирования частоты вращения на вибрации амортизированного асинхронного двигателя в различных диапазонах частот. При этом вибрации в отдельных диапазонах оценивались интегрально по общему уровню виброускорения в данном диапазоне частот.

Из приведенных данных следует, что для данного случая вообще может быть поставлен вопрос о практической целесообразности применения регулирования для снижения вибраций. Действительно, если номинальная частота вращения равна 10, то снижение частоты в 1,5 раза практически не приведет к снижению вибраций. Снижение частоты в два раза приведет к снижению только высокочастотных вибраций, а для снижения вибраций в низкочастотном диапазоне потребуется снижение частоты вращения более чем в три раза. При этом в широком диапазоне частот вращения (от 6 до 2,5) за счет резонанса амортизации вибрация на частоте вращения превысит номинальное значение.

Приведенные данные иллюстрируют физику влияния резонансных явлений на вибрационные процессы при регулировании частоты вращения.

Для рассматриваемых механизмов этот анализ необходимо выполнять с учетом специфических требований по вибрации. Действительно, если резонансное усиление вибрации не приводит к превышению над требованиями, а регулирование частоты вращения снижает вибрацию до необходимых уровней в другом диапазоне частот, то нет необходимости отказываться от регулирования частоты вращения.

В таблице представлены результаты этого анализа применительно к вибрации и гидродинамическому шуму (ГДШ) центробежных насосов, насосов типа БЭН и для электродвигателей (уровню требований условно соответствует 40 дБ).

Из приведенных данных следует, что для некоторых типов насосов регулирование частоты вращения неэффективно для снижения вибрации, для других – эффективно в определенном диапазоне регулирования, и, наконец, для третьих – эффективно для всего диапазона регулирования.

Отметим, что так же, как и для двигателей, эффективность регулирования зависит от частоты вибрации, которую необходимо уменьшить. Чем выше частота, тем эффективнее и целесообразнее применение регулирования частоты вращения.

**Вибрации и гидродинамический шум электронасосов**

Насос	Характеристика, дБ	Частота, Гц								
		5	10	15	20	25	30	40	50	60
ЦН-10/20М	Вибрация	39	39	40	52	41				
	ГДШ	12	22	26	35	38				
ЭМН-6/20	Вибрация		38		38		38	41	42	
	ГДШ		32		36		36	40	46	
ЭМО-100/20	Вибрация	30	40	41	43	49				
	ГДШ	7	17	28	32	37				
ЭМН-100/20	Вибрация		39		40		42	47	51	
	ГДШ		22		34		38	42	50	
БЭН-89	Вибрация				50		60	66	58	
БЭН-17	Вибрация				47		52	49	49	57

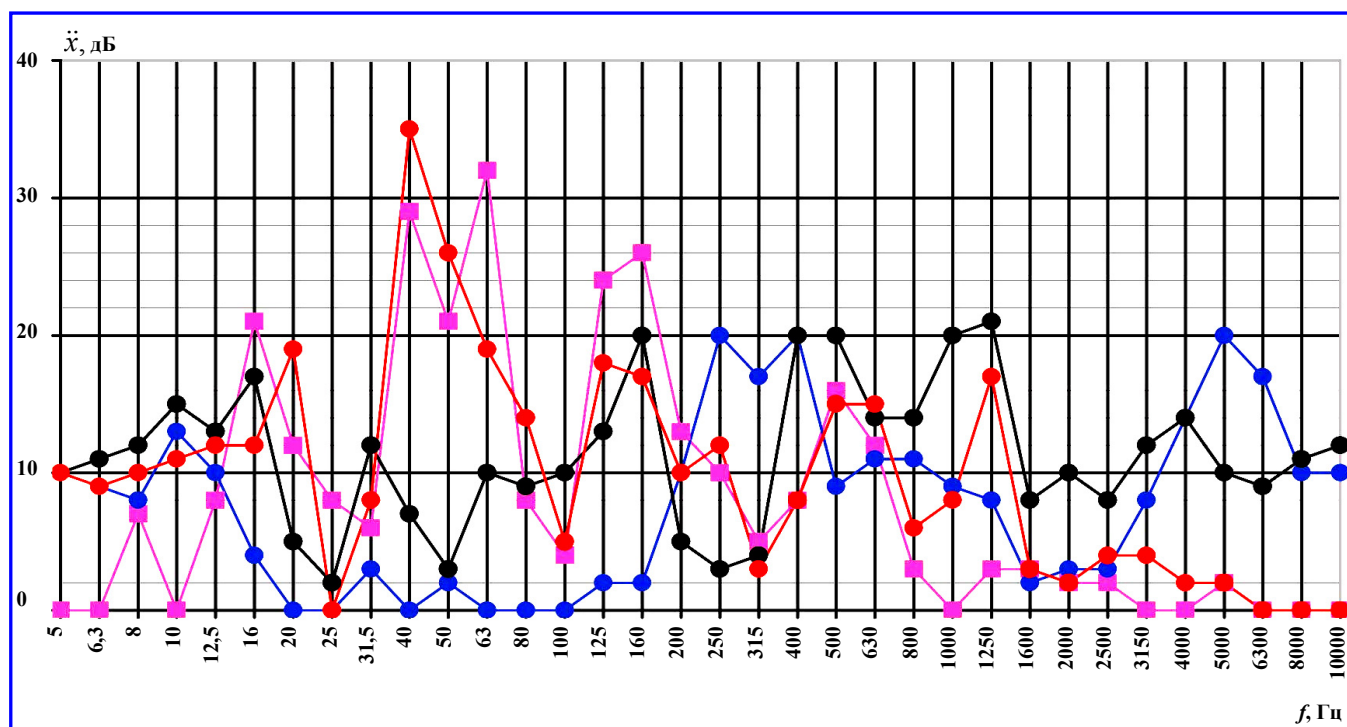


Рис. 2. Вибрации двигателя при питании от различных ПЧ:  
 —■— ПЧ ЭКТ; —●— ПЧ «Симонерт»; —●— ПЧ ТНТР; —●— ПЧ ТТПР

Следует также отметить, что регулирование частоты вращения во всех случаях эффективно для снижения ГДШ.

Существенное влияние на уровни вибраций, особенно в резонансных режимах, оказывает качество питающего напряжения. Механизм этого влияния приведен в [3].

На рис. 2 представлены данные по вибрации электродвигателя ЗДМШН160-4 при питании его от различных тиристорных ПЧ, причем за нулевые уровни были приняты уровни вибраций двигателя при питании от электромашиного преобразователя.

Как видно из приведенных данных, ни один из указанной группы ПЧ не обеспечил удовлетворительных вибрационных характеристик. При этом ПЧ с лучшими формами кривой напряжения питания дали заметно лучшие характеристики. Однако более подробные исследования показали, что в ряде случаев (преобразователи типа ЭКТ, ТТПР) самыми существенными отрицательными факторами являлись токовая несимметрия и наличие постоянной составляющей в кривой напряжения.

По результатам приведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- целесообразность и эффективность применения регулирования частоты вращения с целью улучшения ВШХ могут быть определены только на основе анализа ВШХ конкретного ЭМ, который предполагается регулировать;
- чем ниже частота вибраций, которую необходимо снизить, тем проблематичнее применение регулирования, независимо от качества преобразователя. При частотах вибраций от 5 Гц до частоты вращения может быть неэффективным даже «чистое» регулирование. Решение о целесообразности регулирования в этих случаях должно приниматься, исходя из эффективности влияния регулирования на другие параметры ЭМ;
- ПЧ должен в первую очередь обеспечить такое качество питания, которое бы не ухудшало ВШХ ЭМ по сравнению с питанием его от сети или электромашиного преобразователя. Решение этой проблемы является первоочередным и наиболее значительным шагом в развитии малоинерционного регулируемого привода;
- эффективность попыток улучшения ВШХ при применении ПЧ по сравнению с «чистым» регулированием зависят от наличия и значимости в спектре конкретного механизма электромагнитных составляющих вибрации.

В настоящее время достигнут существенный прогресс в производстве преобразовательной техники для общепромышленных нужд. На рынках предлагается широкий набор ПЧ импортного производства с разнообразным программным обеспечением. Поэтому в настоящее время возобновились работы по проектированию и производству регулируемых двигателей специального назначения.

По решению ряда вопросов, таких как увеличение частоты ШИМ за 10 кГц, максимальное улучшение качества напряжения и тока, запреты на работу в резонансных зонах и др., принимаются определенные меры. Вместе с тем, ряд вопросов не рассмотрен, и это может вызвать определенные трудности при проектировании и производстве запланированного оборудования. Оценим некоторые из них.

Отмеченный выше запрет работы в резонансных зонах при реализации может встретить существенные затруднения в связи со сложностью резонансных явлений. Практика выпуска двигателей на требования 4 показала, что резонансные частоты могут изменяться от образца к образцу. Кроме того, резонансные усиления вибраций при естественном возбуждении могут лежать в достаточно широком диапазоне частот. Поэтому запретные зоны могут быть широкими. Это положение иллюстрируется рис. 3, на котором представлена резонансная область вибраций асинхронного двигателя в средне-частотном диапазоне, из которого следует, что если нужно избежать работы с усилением вибрации на 10 дБ, то необходимо наложить запрет на диапазон частот равный 10% от базового значения.

И, наконец, резонансы различного происхождения могут реализовываться на разных частотах вращения.

Таким образом, возникает необходимость адаптации ПЧ, основанная на экспериментальных данных по ВШХ двигателя во всем диапазоне частот. Однако применительно к резонансным явлениям в ЭМ адаптированный подобным образом ПЧ может оказаться не эффективным. В этом случае необходимо будет адаптировать ПЧ применительно к резонансам ЭМ, и, соответственно, признать отладку системы ПЧ-ЭД не целесообразной.

Следующая проблема, которая возникает при питании ЭД от ПЧ, состоит в определении режима статочных испытаний. Речь, прежде всего, идет о количестве диапазонов частот вращения, в которых проводятся измерения вибраций.

Кроме того, для не регулируемых ЭД, питающихся от сети, целесообразным режимом для приемосдаточных испытаний является холостой ход. При питании от ПЧ режим холостого хода может быть обеспечен при различных условиях

питания влияющих на вибрацию. Например при холостом ходе можно изменить величину рабочего магнитного потока, что изменит магнитные вибрации. Соответствующий режим нельзя будет реализовать в ЭМ при работе двигателя под нагрузкой. Таким образом, возникает необходимость в специальном контроле режима питания от ПЧ при испы-

таниях на холостом ходу, либо испытаниях его под нагрузкой.

Отмеченные проблемы уже проявляются в работе по созданию оборудования для заказа «Борей-4». В частности, на рис. 4 представлены данные испытания макетного образца двигателя, питающегося от современного макетного образца ПЧ.

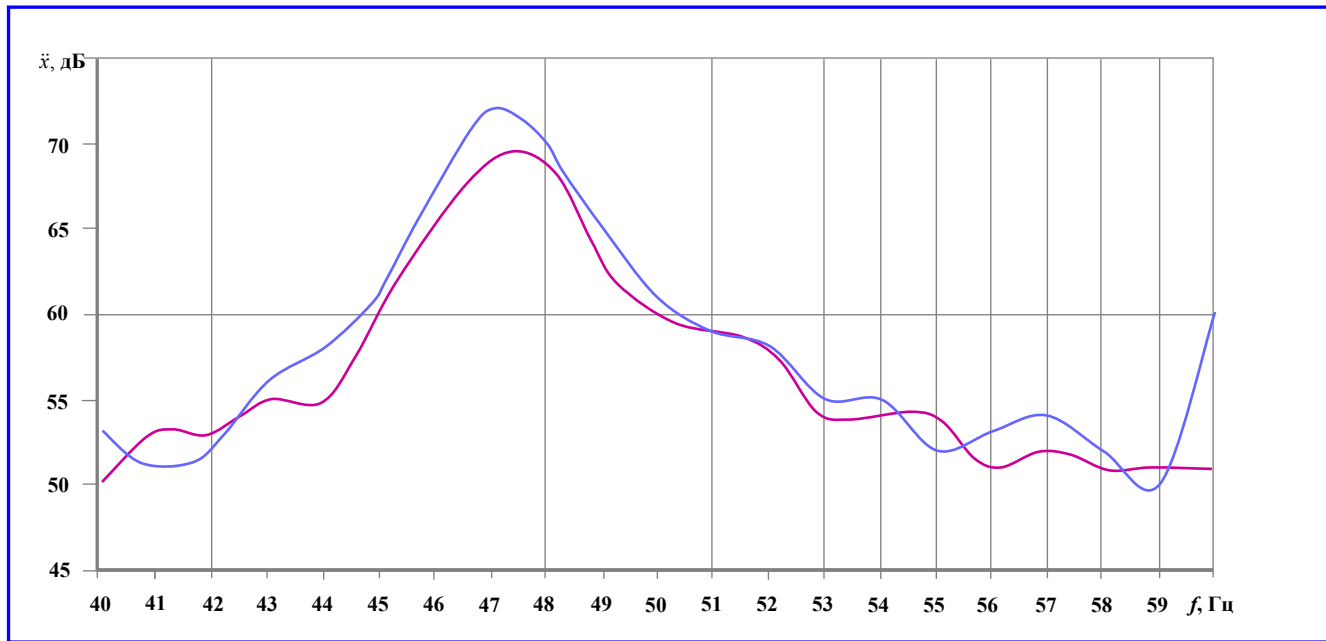


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики осевых вибраций двигателя 4АН280А2:  
 — увеличение частоты; — снижение частоты

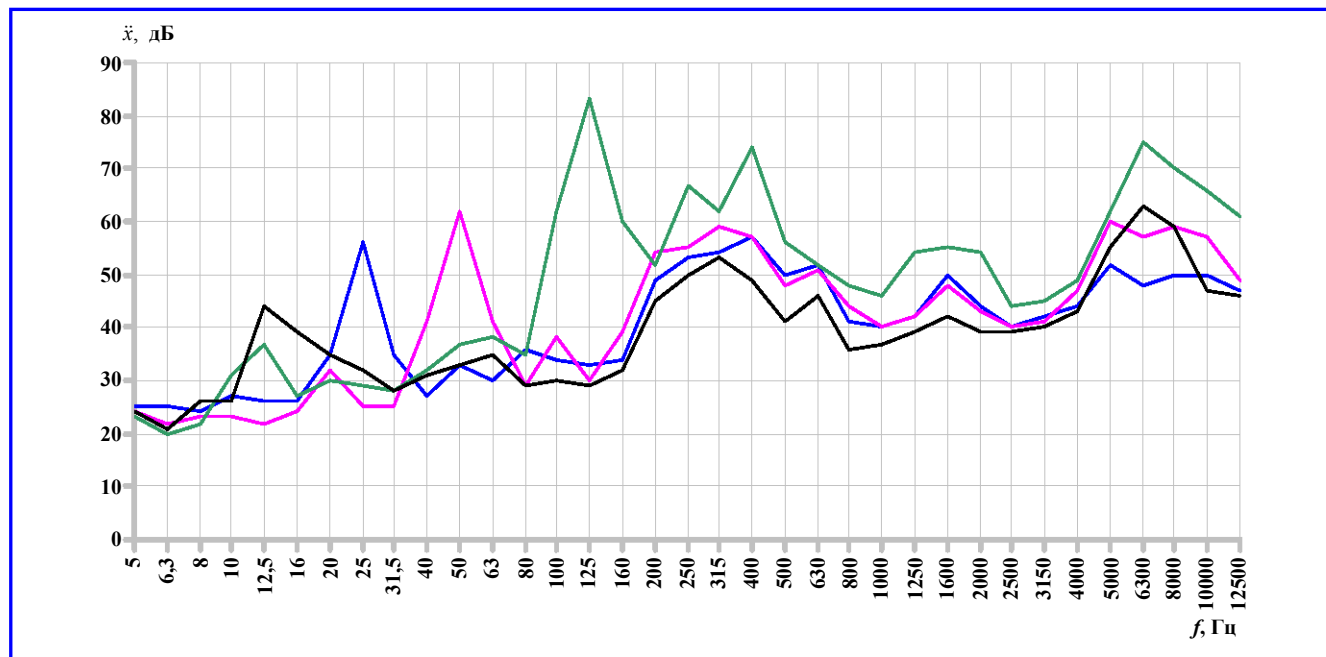


Рис. 4. Вибрации макета синхронного двигателя, питаемого от ПЧ:  
 — 50 Гц; — 100 Гц; — 250 Гц; — 20 Гц

Отметим, что в диапазоне частот до 3 кГц не зарегистрировано вибраций, связанных с такими параметрами питания как несимметрия, непериодичность и несинусоидальность. Однако вибрация, вызываемая коммутацией (диапазон 3 – 8 кГц), достаточно высока и изменяется с изменением частоты вращения. Кроме того, из этих данных видно, что в диапазоне частот 200 – 500 Гц имеются резонансные вибрации, которые для данного образца ЭД сохраняют высокие уровни в очень широком диапазоне частоты вращения. Без решения этих проблем, хотя бы в организационном плане, возникнут соответствующие проблемы в нормирова-

нии, входном контроле и организации приемно-сдаточных испытаний.

#### Литература

1. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов / М.П. Костенко // Электричество. – М.: АН СССР, 1925. – № 2. – С. 85 – 95.
2. Борьба с шумом на производстве: справочник / под общей ред. Е.Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
3. О вибрациях асинхронных двигателей, питающихся от преобразователей частоты / Б.И. Зубренков, А.И. Каплин // Динамика, прочность и виброакустика электрических машин. Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 1988. – Т. 86. – С. 79 – 102.

Поступила в редакцию 07.10.2010

*Александр Иванович Каплин, канд. техн. наук, начальник лаборатории,  
т. 366-27-56, e-mail: vniiem@vniiem.ru.*