

ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ С ОСОБО ЖЕСТКИМИ ТРЕБОВАНИЯМИ ПО ВИБРАЦИИ

Г.А. Жемчугов, А.И. Каплин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрен опыт создания электромеханизмов с особо жесткими требованиями по вибрации.

Описана конструкция конкретного электронасоса, спроектированного с учетом Положения о комплексном проектировании электромеханизмов, и приведены данные о его испытаниях, которые показали высокую эффективность такого подхода.

Предложены дальнейшие пути развития комплексного проектирования.

Ключевые слова: электромеханизм, требования по вибрации, комплексное проектирование.

В НПП ВНИИЭМ накоплен значительный опыт в разработке и создании электрооборудования с особо жесткими требованиями по вибрации.¹

Основная часть научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ была направлена на поиск и внедрение методов и средств обеспечения жестких требований по вибрации для отдельных электродвигателей, генераторов и, в меньшей степени, преобразователей частоты. Для них задавались соответствующие требования по уровням вибрации, которые являлись основными критериями, определяющими применимость машины.

В мировой практике требования к машинам общего применения (стандарты МЭК, ИСО, отечественные ГОСТы) соответствуют качеству применяемых материалов и комплектующих изделий, действующему уровню технологии изготовления, не ущемляют другие показатели машины и не требуют существенных материальных затрат. Директивный подход к формулировке требований по вибрации для специальных электромеханизмов обуславливает существенные отличия этих требований от требований к вибрации обычных электрических машин. Эти отличия заключаются как в разнице уровней, так и в разнице зависимостей требований от мощности, габаритов и назначения электромеханизмов. Поэтому если учесть, что с каждым новым поколением оборудования требования ужесточаются в прямом исчислении примерно в два раза, а расходы на обеспечение требований по вибрации и шуму растут экспоненциально, то очевидно, что возможные ресурсы по обеспечению требований оказываются исчерпанными. Именно так сложилась ситуация с производством электродвигателей.

В настоящее время идет производство двигателей 4-го поколения.

При проектировании и производстве двигателей 1-го и 2-го поколений (1954 – 1974 гг.) требования по

вибрации обеспечивались за счет внедрения оптимальных или новых технических решений, а также создания соответствующей производственной базы.

К началу разработки двигателей 3-го поколения (1974 – 1975 гг.), когда научно-технический задел, обеспечивший требования для оборудования 1-го – 2-го поколений, был практически исчерпан, требования по вибрации были достигнуты за счет роста массогабаритных показателей. Так, например, показатель кг/кВт (отношение массы к мощности) для двигателей 3-го поколения в 1,25 – 1,6 раза выше, чем для двигателей общего применения.

Перед проектированием двигателей 4-го поколения (1980 г.), для которых требования по вибрации также были ужесточены, была выполнена специальная НИОКР по поиску путей обеспечения требований. Основными выводами из этой работы являлись следующие:

– обеспечение требований за счет дальнейшего увеличения массогабаритных показателей не только не рационально, но и не эффективно из-за роста вибрационных динамических сил;

– для большей части номенклатуры двигателей достижение требований регламентировано принципом действия. Характерным в этом отношении является вибрация на двойной частоте сети, вызванная основным полем. Было показано, что для этой составляющей требования 4 не могут быть обеспечены для двухполосных асинхронных двигателей мощностью выше 10 кВт;

– для электродвигателей того же диапазона мощностей и частоты вращения были исчерпаны возможности достижения требований по вибрации на подшипниковых частотах и по воздушному шуму.

В создавшейся ситуации потребовалось принципиальное изменение подходов к проектированию электродвигателей и электромеханизмов.

В 80-х годах прошлого столетия авторами было разработано и предложено «Положение о комплексном проектировании электромеханизмов». Основ-

¹ Вопросы электромеханики. Методы проектирования маломощных электрических машин. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – Т. 103. – 180 с.

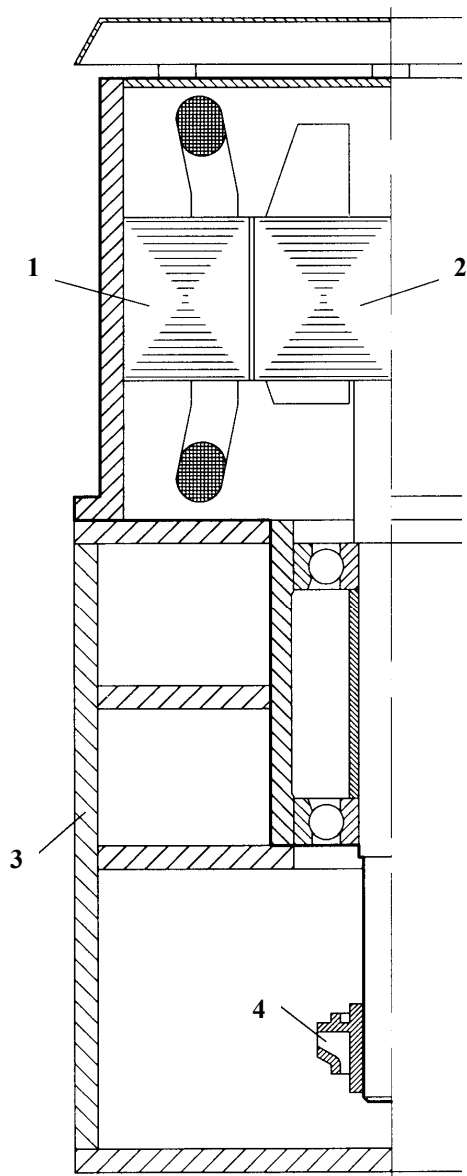


Рис. 1. Схема части насосного агрегата

ная идея состояла в том, чтобы в максимальной степени перейти к созданию оборудования, в котором двигатели и исполнительные механизмы были бы объединены в единое целое, и тогда бы требования по вибрации предъявлялись и обеспечивались для единого электромеханизма в целом.

Следует отметить, что сама по себе идея создания интегрированных конструкций далеко не нова. В технике есть масса примеров интегрированных конструкций. Новым в данном предложении являлось положение о возможности улучшения виброакустических характеристик двигательной части в интегрированных конструкциях.

Положение содержало предложения по многим аспектам, начиная от формулировки требований и

заканчивая некоторыми конструктивными предложениями, процедурами доводки и сдачи оборудования, порядком нормирования виброшумовых характеристик и др. Однако в силу сложившейся специализации производства электромеханизмов, при котором отдельные их части производились на предприятиях различных ведомств, реализация предложенных вариантов Положения оказалась невозможной. Мало того, даже в существенно усеченном виде Положение встретило неприятие со стороны различных ведомств, которое удалось преодолеть благодаря поддержке АН СССР (акад. К.Н. Фролов). В настоящем утвержденном виде Положение определяет только измененную формулировку требований к электродвигателям, новый порядок сдачи их по вибрации и порядок нормирования вибрационных характеристик.

В качестве конструктивной реализации Положения во ВНИИЭМ была предложена (В.В. Александровский и др.) шпиндельная конструкция двигателей, которая нашла поддержку и внедрение в конструкции насосов (гл. конструктор В.Н. Васильев, «НПО «Гидромаш»). Разработанная во ВНИИЭМ шпиндельная конструкция двигателя была, в рамках упомянутой выше НИОКР, изготовлена и испытана в качестве макетного образца как отдельно, так и в составе макетного образца насоса. Результаты испытаний оказались весьма обнадеживающими, и поэтому конструкция была рекомендована заводу ХЭЛЗ (г. Харьков) для последующего внедрения. До распада СССР на этом заводе были изготовлены опытные образцы двигателей, которые стали основой для конструкций двигателей 4АН, предназначенных для насосного агрегата ЦН-314 производства «НПО «Гидромаш».

Насосный агрегат состоит из четырех насосов, объединенных в единый блок. При этом для трех насосов применялись двигатели на 3000 об/мин, для одного – на 1500 об/мин. Схема части насосного агрегата со шпиндельным двигателем представлена на рис. 1. Шпиндельный двигатель в данном агрегате представлял собой статор 1, установленный в корпус насоса 3, и ротор 2, который посажен на единый вал с рабочим органом насоса 4, что не позволяло привести его во вращение без дополнительных приспособлений. Поэтому все испытания двигателя, и в том числе на собственные вибрации и шум, производились при установке статора и ротора в имитацию корпуса. Разница в условиях работы и испытаниях двигателей при установке их в блок и имитатор оказалась весьма существенной за счет различных масс, условий закрепления и работы, амортизации и т. д. Влияние этой разницы и



Рис. 2. Обобщенные результаты измерения вибраций

определяет расчеты на эффективность методов комплексного проектирования.

С 2006 г. и до настоящего времени произведено значительное количество электродвигателей 4АН и укомплектованных ими агрегатов. Выполнены подробные исследования ВАХ электродвигателей и совместные с «НПО «Гидромаш» исследования ВАХ агрегата ЦН-314. Это позволяет провести достоверную оценку результатов комплексного проектирования и использования Положения.

По результатам измерения вибраций двигателей следует отметить, что двигатели на 1500 об/мин практически полностью удовлетворили требованиям, а двигатели на 3000 об/мин, как и предполагалось, на ряде частот имеют вибрации выше требуемых. Поэтому оценка вибрации отдельных двигателей и их вибраций в составе насоса акцентирована на двухполюсных двигателях.

На рис. 2 представлены обобщенные результаты измерения вибраций двухполюсных электродвигателей и насосного агрегата.

Из приведенных данных следует, что максимальные вибрации двигателей реализуются на следующих частотах: 20, 50, 100, 160, 315, 1600 – 2000 Гц. Подробные исследования вибраций, выполненные с использованием расчетных и экспериментальных методов разделения источников вибраций¹, позволили идентифицировать вибрации на приведенных частотах следующим образом.

Вибрация на частоте 20 Гц вызвана резонансными явлениями на собственной частоте амортизации, которые неизбежны при испытаниях амортизированного двигателя.

Вибрация на частоте 50 Гц вызвана небалансом ротора.

Вибрация на частоте 100 Гц вызвана основным магнитным полем двигателя, что, как указывалось выше, неизбежно для двухполюсного асинхронного двигателя.

Вибрации на частотах 160, 315 Гц вызваны подшипниками при наличии резонансных частот ротора в указанных диапазонах.

Вибрации в диапазоне 1600 – 2000 Гц вызваны как подшипниками, так и высокочастотными гармониками магнитного поля.

Уровни вибраций на данных частотах имеют существенный разброс. Однако для всех их характерно превышение над требованиями. В таблице представлены величины превышений, в скобках указано количество образцов двигателей с превышениями в %.

Превышение вибраций над требованиями

Механизм	Частота, Гц						
	20	50	100	160	315	1600	2000
Двигатель	до 18 (80)	до 10 (50)	до 18 (100)	до 10 (70)	до 20 (100)	до 2 (10)	до 7 (33)
Агрегат	0	0	3	3	3	2	3

¹ Вопросы электромеханики. Методы проектирования маломощных электрических машин. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – Т. 103. – 180 с.

Как видно из рис. 2, спектры вибраций двигателей и агрегата имеют существенные различия.

Подробные, совместные с «НПО «Гидромаш», исследования спектров насосов с разделением источников вибраций, показали, что по всему спектру на составляющих, вызванных работой двигателя, отсутствует усиление вибраций. Это обстоятельство полностью опровергает существующую формулировку требований к вибрации двигателей, согласно которой эти требования жестче, чем требования к вибрации агрегата, и подтверждает справедливость предложений Положения.

Для спектра двигателя характерно наличие отчетливо выраженных дискретных составляющих, в то время как в спектре насоса они практически отсутствуют. Поэтому все отмеченные выше максимальные составляющие вибраций отдельного двигателя в агрегате существенно снижаются. Соответственно (см. таблицу) и превышения над требованиями в составе агрегата на составляющих, обусловленных работой двигателей, практически отсутствуют. Во всяком случае, их значения таковы, что техническая перспектива снижения вибраций двигателей на данных частотах становится вполне реальной.

Следует отметить, что с технической стороны не удалось реализовать все конструктивные идеи, заложенные еще в 1984 г., в шпиндельной конструкции двигателей. Это объясняется тем, что между разработкой конструкции и ее реализацией, в силу известных событий, произошел существенный перерыв, отрицательно сказавшийся на технических, технологических и экономических возможностях. Поэтому, как отмечено выше, вибрации агрегата имеют небольшие превышения над требованиями. Вместе с тем, рассмотренный в настоящей работе опыт комплексного проектирования относится к наиболее сложному и мощному агрегату. В остальных трех типах насосов, выпущенных с применением Положения, превышения над требованиями отсутствуют.

Определенные положительные моменты достигнуты в организации процесса сдачи-приемки электродвигателей. Так, например, с учетом необходимости балансировки роторов после сборки с насадкой исполнительного органа, был упрощен процесс балансировки отдельных роторов. Было также достигнуто соглашение о проведении входного контроля двигателей по ВШХ на стендах ВНИИЭМ.

В научном плане совместные исследования вибрационных характеристик двигателей и агрегатов позволили прояснить ряд вопросов по разделению источников вибрации, природе происхождения отдельных составляющих, возможностям их снижения и т. д. Таким образом, внедрение «Положения о комплексном проектировании электромеханизмов» в практику проектирования электронасосов с особо жесткими требованиями по вибрации полностью себя оправдало.

Вместе с тем, ряд вопросов комплексного проектирования нуждается в дальнейшем уточнении и совершенствовании. К ним относятся, прежде всего, вопросы развития конкретных интегрированных конструкций, вопросы формализации предъявления требований и нормирования по ВШХ и другим показателям двигателей в рамках комплексного проектирования, вопросы исследования и расчета ВШХ интегрированных конструкций и др.

Эти вопросы должны решаться в процессе комплексного проектирования современных и перспективных электромеханизмов.

Приведенный положительный опыт комплексного проектирования дает основание считать перспективным использование его применительно к более широким структурам – агрегатированным сборкам и установкам на местах использования, в которых положительный эффект может быть достигнут за счет конструктивно-компоновочной оптимизации колебательной системы от источников вибрации до окружающей среды.

Поступила в редакцию 16.06.2009

*Георгий Александрович Жемчужов, канд. техн. наук, зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 365-25-70.
Александр Иванович Каплин, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-27-56.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.*