

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ВАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.И. Новик, докт.техн.наук, **Е.Ю. Неболюбов**, канд.техн.наук, **А.С.Левицкий**, канд.техн.наук, **Л.В.Архипова**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03860, Украина.

Показана суть задачи измерения биений вращающихся валов машин. Предложены варианты структурных схем электронных преобразователей биения при использовании в качестве чувствительного элемента емкостного датчика с переменным зазором. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: электромашина, вал, радиальное биение, емкостный датчик.

Одним из важных диагностических параметров мощных электрогенераторов и других электромашин является биение цилиндрической поверхности вала. Как известно, причинами повышенного биения вала машины могут быть, в частности, механический дисбаланс ротора гидрогенератора и рабочего колеса турбины, искажение формы ротора и статора, перекосяк и искривление осевой линии вала, неперпендикулярность опорного диска подпятника и вала генератора и т.п. Получение достоверной информации о биении вала работающей машины позволяет диагностировать более половины всех возможных дефектов гидроагрегата [4]. Однако измерительные устройства, позволяющие получить измерительный информативный сигнал о величине биения (преобразователи биения), освещены в литературе недостаточно полно.

Цель настоящей статьи – описание разработанных авторами вариантов построения измерительных преобразователей биения на основе емкостного датчика измерителя расстояния до заземленной поверхности (емкостного датчика зазора).

Радиальным биением вращающегося вала называют разницу между наибольшим и наименьшим расстояниями от реальной поверхности вала до базовой оси (оси вращения) за один оборот [7,9]. Исходя из этого определения, нахождение величины биения обычно сводят к измерению текущего расстояния от некоей неподвижной относительно оси вращения точки (опорной точки) до поверхности вала в процессе его вращения с последующим вычислением разности между максимальным и минимальным значениями этого расстояния. Для определения текущего расстояния используют различные устройства – либо контактные, например, механические индикаторы часового типа (главным образом, на остановленных машинах в режиме медленного проворота вала «вручную»), либо бесконтактные (токовихревые, индуктивные, емкостные, оптические, в том числе, лазерные, и др.), т.е. устройства на тех же принципах, которые используются при измерении зазора между статором и ротором машины [3].

Подчеркнем, что наиболее перспективным путем построения устройств измерения биений, как и устройств измерения зазора, является использование емкостного бесконтактного датчика, представляющего собой квазиплоский конденсатор с переменным зазором, у которого один электрод (активный) закреплен на опорной поверхности, а вторым электродом является цилиндрический вал, биения которого исследуются. При включении этого датчика в измерительную компенсационно-мостовую цепь специальной конфигурации [2] и обеспечении необходимого экранирования активного электрода и подводящего провода [5] получаем выходной сигнал преобразователя в виде постоянного напряжения $U_{ВЗ}$, которое обратно пропорционально емкости конденсатора датчика, т.е. прямо пропорционально величине воздушного зазора. Погрешности за счет отклонения формы электродов датчика от идеальной при рациональном выборе его геометрических параметров относительно невелики [4], поддаются расчету и могут быть учтены при практическом выполнении измерений.

При размещении электрода емкостного датчика возле цилиндрической поверхности вращающегося контролируемого вала (на расстоянии, несколько большем амплитуды ожидаемого биения) на выходе вторичного преобразователя ВП будет действовать напряжение $U_{ВЗ}$, содержащее постоянную и некую периодическую переменную составляющие. Заметим, что, поскольку информацию о биении несет только переменная составляющая $U_{ВЗ}$, величина начального зазора датчика не имеет значения.

Справедливо это лишь до тех пор, пока погрешность нелинейности, вызываемая краевым эффектом поля в конденсаторе, не превышает приемлемой величины. Детальное рассмотрение данного вопроса выходит за рамки настоящей статьи, однако принято считать, что приемлемая линейность характеристики датчика сохраняется до тех пор, пока величина зазора не превосходит поперечный размер активного электрода датчика и при этом активный электрод окружен компланарным с ним эквипотенциальным охранным электродом достаточной площади.

Для нахождения напряжения U_B , пропорционального величине биения, необходимо найти ординаты двух точек с максимальным и минимальным за период (за один оборот вала) значениями U_{B3} и вычислить разность U_B этих ординат

$$U_B = U_{B3max} - U_{B3min},$$

при этом величина постоянной составляющей напряжения U_{B3} не имеет значения.

Рассмотрим возможные варианты структур преобразователей биения вала. В качестве входного информативного сигнала будем использовать напряжение U_{B3} , получаемое с выхода вторичного преобразователя (ВП) емкостного измерителя зазора.

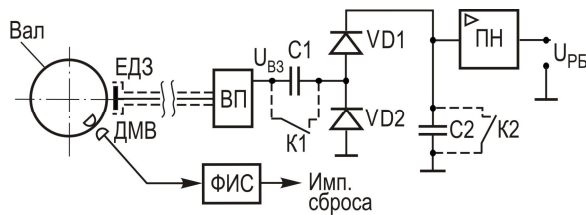


Рис. 1

Простейший преобразователь биений может быть построен на основе известной схемы выпрямителя с удвоением напряжения. На рис. 1 в левой части схематично изображен вал, емкостный датчик расстояния до проводящей поверхности, расположенный вблизи поверхности вала и обозначенный как датчик зазора ЕДЗ, а также датчик метки вала ДМВ, генерирующий один импульс в течение каждого оборота вала. Датчик ЕДЗ соединен с ВП специальным экра-

нированным кабелем. На выходе ВП действует напряжение U_{B3} , отражающее в некотором масштабе величину зазора между валом и датчиком. Это напряжение подается на правую часть схемы – собственно выпрямитель с удвоением напряжения (конденсаторы $C1$, $C2$; диоды $VD1$, $VD2$), причем конденсатор $C1$ является еще и разделительным – отсекает постоянную составляющую сигнала U_{B3} . При идеальных характеристиках диодов (прямое сопротивление близко к нулю, обратное – к бесконечности) и отсутствии утечки конденсаторов $C1$, $C2$, а также большом входном сопротивлении буферного каскада – повторителя напряжения (ПН) на выходе схемы будет постоянное напряжение U_B , пропорциональное величине биения.

К датчику метки вала (ДМВ) подключен формирователь импульсов сброса ФИС. Один раз в течение цикла измерения (от одного до нескольких оборотов вала) импульс сброса кратковременно замыкает ключи $K1$ и $K2$, напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ обнуляются, после чего цикл повторяется.

Недостатком описанной структуры является необходимость подбора параметров элементов для каждого сравнительно узкого диапазона частот вращения вала, в противном случае возникают заметные погрешности. Так, на низких частотах вращения сказываются проводимости утечки конденсаторов и обратные сопротивления диодов. На повышенных оборотах сильнее влияет прямое сопротивление диодов, поскольку конденсаторы не успевают полностью зарядиться до амплитудного значения напряжения. Частично влияние этого фактора может быть уменьшено, если использовать предложенный в [6] метод ускоренного заряда емкости с помощью форсирующих усилителей. Суть метода заключается в том, что падение напряжения на прямом сопротивлении диода, через который заряжается конденсатор, подается на дифференциальный вход усилителя, с выхода которого многократно усиленный сигнал через другой диод подается на тот же конденсатор. Благодаря этому резко уменьшается постоянная времени заряда (приблизительно в k раз, где k – коэффициент усиления форсирующего усилителя). Однако устройство существенно усложняется.

Характеристики преобразователя могут быть улучшены без применения форсирующих усилителей, если вместо диодов $VD1$, $VD2$ использовать полупроводниковые ключи с малым сопротивлением в открытом состоянии. В этом случае необходимо устройство, формирующее короткие импульсы управления ключами в моменты прохождения сигналом максимумов и минимумов. Примеры построения таких устройств, называемых экстрематорами, известны [8]. Один из описанных экстрематоров основан на операционном усилителе с резко нелинейной обратной связью (ОС). В частности, в цепь ОС включаются встречно-последовательно два стабилитрона или один двуханодный стабилитрон. Если на вход такого усилителя подать изменяющийся во времени сигнал (напряжение) произ-

вольной формы, то каждый раз при изменении знака первой производной на противоположный на выходе появляется резкий перепад (фронт) напряжения, положительный или отрицательный – в зависимости от того, максимум или минимум сигнала имеет место в данный момент времени. Из перепадов напряжения легко могут быть сформированы короткие импульсы соответствующей полярности.

Другой вариант построения преобразователя биений можно реализовать с применением устройств выборки-хранения (УВХ) и упомянутого выше экстрематора. Структура показана на рис. 2.

Здесь напряжение $U_{ВЗ}$ подается одновременно на два устройства УВХ1 и УВХ2 и на вход экстрематора ЭКС. С помощью дифференцирующей цепочки (ДЦ) формируются короткие импульсы, которые затем используются для управления УВХ. На одно из устройств УВХ управляющий импульс подается после изменения полярности на противоположную с помощью инвертора ИНВ (предполагается, что входы управления УВХ чувствительны к импульсам только одной полярности). В результате на выходе одного из УВХ будет действовать максимальное значение напряжения $U_{ВЗ}$ за весь период наблюдения, на выходе второго – минимальное. Эти два напряжения через два буферных повторителя ПН подаются на аналоговое вычитающее устройство, например, как показано на рис. 4, на входы дифференциального измерительного усилителя ДИУ. На выходе ДИУ получается разность $U_{ВЗmax} - U_{ВЗmin}$, которая и отражает величину биения вала. Периодически, один раз в течение оборота вала, производится сброс обоих УВХ с помощью импульса, снимаемого с выхода формирователя импульса сброса ФИС, на вход которого подан импульс от датчика метки вала ДМВ. Для исключения потери или искажения информации в тех редких случаях, когда экстремум напряжения $U_{ВЗ}$ совпадает по времени с импульсом метки вала, можно предусмотреть подачу импульса сброса не на каждом обороте вала, а один раз за несколько оборотов, с учетом того, что величина биения в обычных условиях изменяется очень медленно.

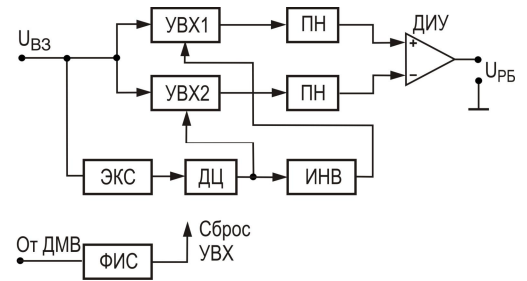


Рис. 2

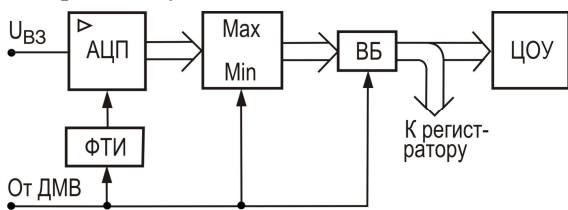


Рис. 3

Наиболее универсальная структура, пригодная для построения преобразователя биений практически для любой частоты вращения вала (от низкооборотных гидрогенераторов 50–100 об/мин до машин с частотой вращения в тысячи об/мин), может быть построена с использованием цифровой схемотехники. На рис. 3 показана структурная схема такого преобразователя. Напряжение $U_{ВЗ}$ от вторичного преобразователя воздушного зазора поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП, который кодирует выборки сигнала $U_{ВЗ}$ с заданной периодичностью. Из накопленного в буфере АЦП за время одного оборота вала массива отсчетов с помощью несложного программного обеспечения определяются максимальное и минимальное значения (блок Max-Min), затем с помощью вычитающего блока ВБ вычисляется их разность, и результат подается на цифровое отсчетное устройство ЦОУ и, при необходимости, на другие регистрирующие устройства. (При практическом выполнении преобразователя в соответствии с рис. 3 все входящие в него функциональные блоки, кроме отсчетного устройства, могут быть реализованы внутри одного микроконтроллера.)

Отдельного обсуждения требует вопрос о выборе частоты дискретизации по времени исследуемого сигнала, т.е. частоты тактовых импульсов АЦП. От этого параметра будет зависеть погрешность определения $U_{Б}$. Учитывая, что вблизи вершины синусоиды функция изменяется очень медленно, можно заключить, что слишком высокая частота дискретизации здесь не нужна. Элементарный расчет показывает: если тактовые импульсы будут поступать с периодом, равным, например, $1/360$ времени оборота, т.е. через каждый градус поворота вала, то максимальная относительная погрешность от дискретности определения максимума или минимума составит $0,5(1 - \sin 89^\circ) \approx 7,6 \cdot 10^{-5}$ или менее 0,01%; при дискретности в $1/100$ (через каждые $3,6^\circ$) – около 0,1%. Поэтому на практике вполне достаточно, чтобы за время одного оборота вала было сделано 100–300 выборок сигнала $U_{ВЗ}$. Однако это число выборок на один оборот должно быть постоянным при любой скорости вращения. Для привязки частоты тактовых импульсов к частоте вращения вала в структуре рис. 3 предусмотрен формирователь тактовых импульсов ФТИ, который, по сути, является множителем частоты импуль-

сов ДМВ (частоты вращения) на постоянный коэффициент (100–300 или другое выбранное число). Такой умножитель может быть выполнен, например, на основе управляемого генератора импульсов и системы ФАПЧ [2].

Импульсы сброса от ДМВ после каждого цикла измерения обнуляют буфер АЦП, а также содержимое блоков Max-Min и ВБ.

Рассмотренные варианты построения преобразователей биений вала с емкостными датчиками в качестве чувствительного элемента позволяют создавать диагностические устройства для электромашин с практически любой реально используемой частотой вращения.

1. Голуб В.С. Система ФАПЧ и ее применения // Chips News. – 2000. – № 4.
2. Гриневиц Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. – Киев: Наук. думка. – 1987. – 112 с.
3. Левицкий А.С. Методы та прилади автоматичного виміру повітряного зазору в гідрогенераторах // Гідроенергетика України. – 2007. – №4. – С. 29–35.
4. Левицкий А.С., Новик А.И. Оценка погрешности измерения емкостными датчиками биений валов электрических машин // Технічна електродинаміка. – 2010. – №4. – С. 66–70.
5. Левицкий А.С., Новик А.И., Неболюбов С.Ю. Створення ємнісного вимірювача повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах // Праці ІЕД НАНУ. – 2010. – Вип. № 26 – С. 54–62.
6. Новик А.И., Шеремет Л.П. Аналоговое запоминающее устройство / Авт. свид. СССР №487423 М.кл.² G 11 C 27/00 // Бюллетень изобретений. – 1975. – № 37.
7. Школьник В.Э. Измерение радиального биения цилиндрических поверхностей вала ротора электрических машин / В кн.: Сборник «Электросила». – С.-Пб.: Электросила, 2001. – С. 3–8.
8. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. – Київ: Техніка, 1983. – 213 с.
9. ГОСТ 24642-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения.

УДК 621.313.322; 621.317.39.084.2

ВАРІАНТИ ПОБУДОВИ ЄМНІСНИХ ВИМІРЮВАЧІВ РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ ВАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
А.І.Новик, докт.техн.наук, С.Ю.Неболюбов, канд.техн.наук, А.С.Левицький, канд.техн.наук, Л.В. Архіпова
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги 56, Київ-57, 03680, Україна.

Показано суть задачі вимірювання биття обертових валів машин. Запропоновано варіанти структурних схем електронних перетворювачів биття з використанням ємнісного сенсора як чутливого елемента. Бібл. 9, рис. 3.

Ключові слова: електромашина, вал, радіальне биття, ємнісний сенсор.

VARIANTS OF STRUCTURE OF CAPACITIVE MEASURING INSTRUMENTS OF RADIAL RUNOUT OF SHAFTS OF ELECTRICAL MACHINES

A.I.Novik, E.Yu.Neboliubov, A.S.Levytskyi, L.V.Arkhypova
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Substances of task of measurement of runout of rotating shafts of machines are shown. Variants of structure electronic circuits of electronic measuring converters of radial runout with capacitive sensor are proposed. References 9, figures 3.

Key words: electrical machine, shaft, radial runout, capacitive sensor.

1. Golub V.S. PLL system and its application // Chips News. – 2000. – № 4. (Rus)
2. Grinevich F.B., Novik A.I. Measuring compensatory and bridge devices with capacitor sensors. – Kyiv: Naukova dumka. – 1987. – 112 p. (Rus)
3. Levytskyi A.S. Methods and devices of automatic measurement of an air gap in hydrogenerators // Hydroenerhetyka Ukrainy. – 2007. – №4. – Pp. 29–35. (Ukr)
4. Levytskyi A.S., Novik A.I. Assessment of an error of measurement by capacitor sensors of runout of shafts of electrical machines // Tekhnichna elektrodynamika. – №4. – Pp. 66–70. (Rus)
5. Levytskyi A.S., Novik A.I., Neboliubov E.Yu. Creation of a capacitor measuring instrument of an air gap between a rotor and a stator in powerful hydrogenerators // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – Vyp. №26. – Pp. 54–62. (Ukr)
6. Novik A.I., Sheremet L.P. Analog memory / Copyright certificate of the USSR №487423, Int. Cl. G 11 C 27/00 // Bulletin izobretenii. – 1975. – №37. (Rus)
7. Shkolnik V.E. Measurement of radial runout of cylindrical surfaces of a shaft of a rotor of electrical machines // In books: Sbornik “Elektrosila”. – St.-Petersburg: Elektrosila, 2001. – Pp. 3–8 (Rus)
8. Shcherbakov V.I. Grezdov G.I. Electronic circuits with operational amplifiers: Reference-book. – Kyiv: Tekhnika. – 1983. – 213 p. (Rus)
9. GOST 24642-81. Main standards of interchangeability. Form and arrangement admissions. Main terms and definitions. (Rus)

Надійшла 07.05.2012

Received 07.05.2012