

2.2. Первичное преобразование сигналов в системе измерения

Рассматриваются принцип действия ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, поведение его эквивалентной индуктивности в процессе импульсного преобразования по методу первой производной ПП и влияние собственной емкости датчика на выходной сигнал. Приводится описание дифференциальных измерительных цепей и бесконтактного токосъемника, построенного на базе моста Блумлейна, в плечи которого включен трансформатор с подвижными и неподвижными катушками.

2.2.1. Особенности преобразования сигналов одновитковых вихретоковых датчиков по методу первой производной

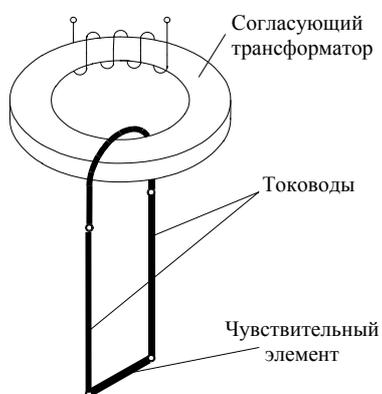


Рис. 2.2. Схематическое изображение ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника

Принцип действия ОВТД иллюстрирует рис. 2.2. ОВТД состоит из трех элементов: согласующего трансформатора, безиндуктивных тоководов и ЧЭ [43]. С помощью безиндуктивных тоководов (близкорасположенных и изолированных друг от друга проводящих полос или соосных цилиндров) ЧЭ вносится в зону измерения с неблагоприятными внешними условиями, в частности, в среду с повышенной температурой¹. Тоководы и ЧЭ образуют виток вторичной обмотки согласующего трансформатора, расположенного в нормальных условиях, а его первичная обмотка включается в ИСх с импульсным питанием.

Как отмечалось во Введении, ОВТД (первичная обмотка согласующего трансформатора) включается в ИСх с импульсным питанием, реализующую метод ПП [30].

На рис. 2.3, а представлена простейшая двухконтурная модель электромагнитного взаимодействия ЧЭ ОВТД с ЭК объекта (например, торцом лопатки, находящимся на расстоянии Y от ЧЭ). Предполагается, что согласующий трансформатор не искажает фронт напряжения питания E прямоугольной формы, которое в контуре ЧЭ возбуждает нарастающий ток i_1 , создающий в окружающем пространстве первичное электромагнитное поле. В контуре, имитирующем ЭК, под действием ЭДС индукции e_2

¹ Примеры конструкций ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника приведены в разделе 4.

возникает ток i_2 , характеризующий вихревые токи и создающий вторичное электромагнитное поле. Через поверхность, ограниченную первичным контуром проходит магнитный поток Φ_{11} , возбуждаемый током i_1 , и поток Φ_{12} , возбуждаемый током i_2 . Для этого контура потокосцепление Ψ_1 определяется полным магнитным потоком $\Phi_1 = \Phi_{11} - \Phi_{12}$.

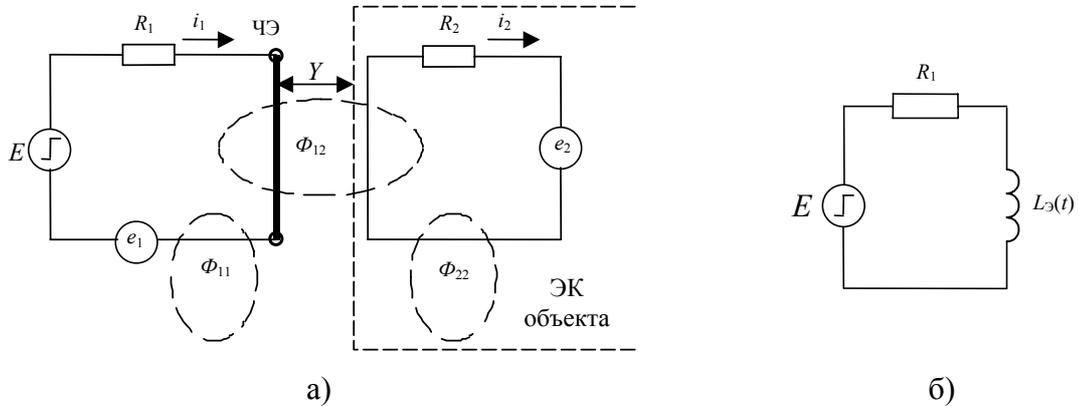


Рис. 2.3. Двухконтурная модель взаимодействия ЧЭ ОВТД с ЭК объекта (а) и ее эквивалентная схема (б).

Потокосцепление Ψ_1 может быть выражено через собственную индуктивность L_1 и взаимную индуктивность M [67] в виде $\Psi_1 = L_1 i_1 - M i_2$. Тогда эквивалентную индуктивность ЧЭ (рис. 2.3, б) можно записать как функцию отношения токов i_1 и i_2

$$L_{\text{Э}} = \Psi_1 / i_1 = L_1 - M \cdot (i_2 / i_1).$$

Согласно [68] выражения для токов i_1 , i_2 в функции времени имеют вид, представленный на рис. 2.4, а, причем при большой удаленности ЭК объекта от ЧЭ ($Y = Y_{\infty}$), когда электромагнитное взаимодействие ЧЭ и ЭК отсутствует ($M = 0$ и $i_2 = 0$) ток i_1 имеет экспоненциальную форму (пунктирная линия), а $L_{\text{Э}} = L_1$.

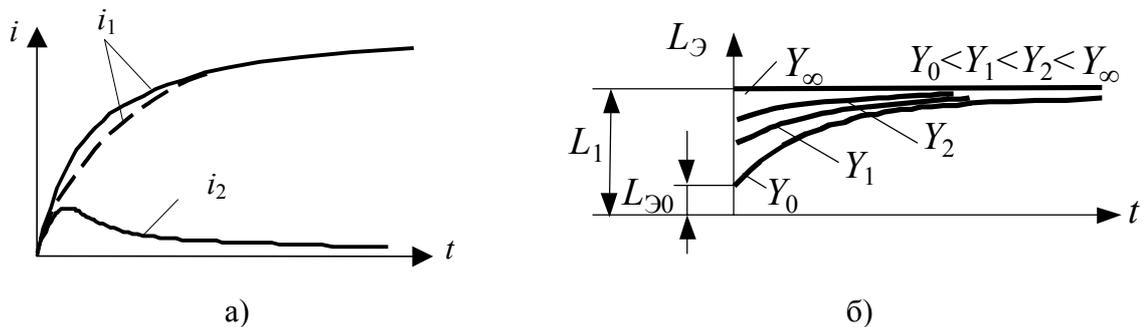


Рис. 2.4. Зависимости изменений токов (а) и эквивалентной индуктивности ЧЭ (б).

С приближением ЭК ($M \neq 0$ и $i_2 \neq 0$) форма тока i_1 отклоняется от экспоненты (сплошная линия) и эти отклонения можно интерпретировать как влияние переменной во времени индуктивности $L_{\text{Э}}(t)$, непостоянство которой в переходном режиме физически

объясняется влиянием вихревых токов в объекте. Нетрудно показать, что в начале переходного процесса при $t \rightarrow 0$ индуктивность

$$L_{\text{Э}} = L_{\text{Э}0} = \lim_{t \rightarrow 0} (L_1 - M(i_2/i_1))$$

минимальна и определяется только величинами собственных индуктивностей обоих контуров (L_1, L_2) а также взаимной индуктивностью контуров (M), которая зависит от преобразуемого параметра - расстояния Y между ЧЭ и ЭК объекта.

В установившемся режиме при $t \rightarrow \infty$ вихревые токи затухают ($i_2=0$), индуктивность $L_{\text{Э}}$ возрастает и стремится к $L_{\text{Э}} = L_1$. На рис. 2.4, б индуктивности L_1 соответствует график функции $L_{\text{Э}}(t)$ при бесконечно большой удаленности Y_{∞} ЭК объекта от ЧЭ ОВТД. На том же рисунке представлено семейство характеристик $L_{\text{Э}}(t)$ при минимальном (Y_0) и других (Y_1, Y_2) расстояниях от ЧЭ до ЭК объекта. Очевидно, что начало переходного процесса характеризуется наибольшей чувствительностью индуктивности $L_{\text{Э}0}$ к изменениям расстояния Y от ЧЭ до ЭК, и в этой связи момент времени $t=0$ наиболее привлекателен для последующих преобразований, осуществляемых с помощью метода ПП.

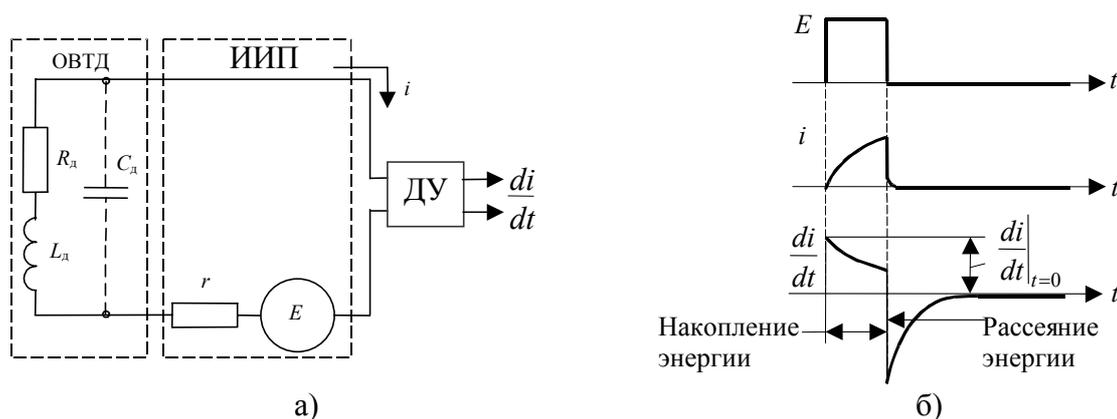


Рис. 2.5. Схема (а) и временные диаграммы (б), поясняющие метод первой производной.

Метод ПП поясняет рис. 2.5. Схема (рис. 2.5, а) содержит импульсный источник питания (ИИП) с ЭДС E и внутренним сопротивлением r , ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, представленный эквивалентными параметрами, устройство дифференцирования тока (ДУ) с нулевым входным сопротивлением. Предполагается, что эквивалентная индуктивность датчика ($L_{\text{д}}$), включающего согласующий трансформатор (рис. 2.2), связана с эквивалентной индуктивностью ЧЭ ($L_{\text{Э}}$) соотношениями $L_{\text{д}} = n_{\text{T}}^2 L_{\text{Э}}$, где n_{T} – коэффициент трансформации согласующего трансформатора, определяемый отношениями индуктивностей его первичной и вторичной обмоток [58].

Если не учитывать собственную емкость датчика (C_d), то переходный процесс в схеме при импульсном возбуждении E с учетом изменяющейся во времени $L_d(t)$, а следовательно и $L_d(t)$, описывается уравнением

$$L_d(t) \frac{di}{dt} + i \cdot \left[\frac{dL_d(t)}{dt} + R_d + r \right] = E.$$

Поскольку функция $L_d(t)$ непрерывная, то для нулевых начальных условий значение производной тока в момент появления напряжения E может быть найдено без решения уравнения, так как $i=0$ при $t=0$ и, следовательно,

$$i \cdot \left[\frac{dL_d(t)}{dt} + R_d + r \right] = 0, \quad \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E}{L_d(0)},$$

где $L_d(0)$ – индуктивность при $t=0$ ($L_d(0)=n_T^2 L_{\Sigma 0}$).

Это означает, что производная тока не зависит от сопротивления датчика R_d и определяется мгновенным значением индуктивности. После фиксации производной и по окончании рассеяния энергии в цепи процесс преобразования может быть повторен (рис. 2.5, б).

Таким образом, метод ПП обеспечивает минимальное время преобразования, максимальную чувствительность к расстоянию до ЭК объекта в момент времени $t=0$ и повышение точности за счет исключения влияния изменений R_d .

С учетом собственной емкости (C_d) ОВТД, шунтирующей L_d и R_d , ток $i(t)$ в начале переходного процесса изменяется скачком и определяется емкостной составляющей $i|_{t=0} = \frac{E}{r}$

(рис. 2.6), а после заряда емкости – индуктивной. В отличие от идеализированной схемы (когда $C_d=0$), где производная максимальна и положительна при $t=0$, в рассматриваемом случае производная достигает максимума при $t=t_m$. Область переходного процесса, где ток i определяется емкостной составляющей, имеет иррегулярный характер и не пригодна для преобразования индуктивности. Поэтому за выходной сигнал принимается максимум производной в начале регулярной области переходного процесса (t_m), в которой влияние основного параметра схемы становится определяющим.

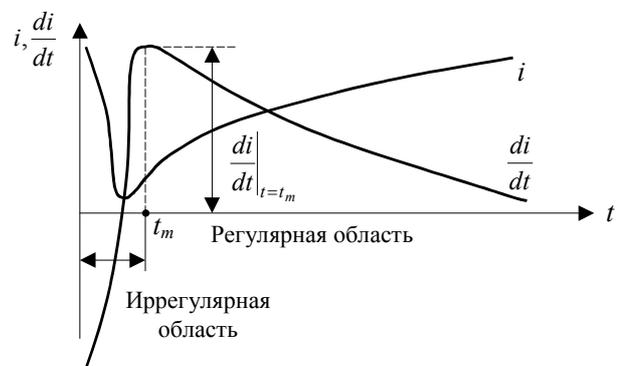


Рис. 2.6. Зависимость от времени тока, проходящего через датчик, и его производной.

Очевидно, что собственные емкости в реальных схемах снижают быстродействие и ухудшают подавление сопротивления (R_d). Однако время t_m не превышает десятков наносекунд, и даже при неблагоприятных соотношениях параметров применение метода ПП обеспечивает значительное подавление влияния активного сопротивления датчика [58].

В заключение следует отметить помимо достоинств метода ПП и его недостатки. Первый связан с нелинейным характером зависимости сигнала на выходе ДУ от индуктивности ОВТД, а второй – с влиянием волновых процессов в линиях связи. Волновые процессы создают значительные помехи полезному сигналу, причем уровень помех максимален в начале переходного процесса, когда фиксируется максимум производной тока. Указанные недостатки в значительной степени устраняются в дифференциальных измерительных цепях, которые рассматриваются в следующем разделе.

2.2.2. Дифференциальные измерительные цепи

Один из возможных вариантов измерительной цепи представлен на рис. 2.7. Она содержит мостовую измерительную схему (ИСх), в два смежных плеча которой включены ОВТД' и ОВТД'' с ЧЭ' и ЧЭ'' в виде отрезков проводников и согласующими трансформаторами (СТ' и СТ''). ЧЭ' и ЧЭ'' контролируют положение ЭК объекта (например, осевые смещения X колеса ротора (раздел 1.3.3, рис. 1.16)). При этом преобразуемые смещения ЭК из начального положения приводят к изменениям эквивалентных индуктивностей датчиков ($L'_d = L_0 + \Delta L$, $L''_d = L_0 - \Delta L$). Питание ИСх осуществляется от ИИП (E).

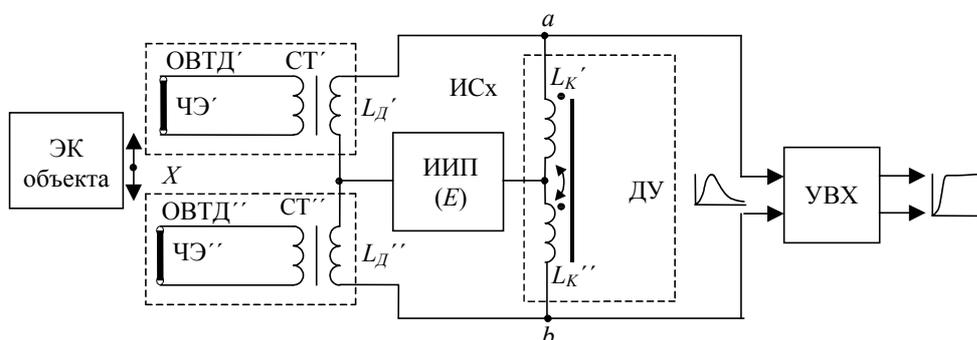


Рис. 2.7. Дифференциальная измерительная цепь с мостом Блумлейна.

В качестве устройства дифференцирования токов (ДУ) используются магнитосвязанные катушки (коэффициент связи равен единице). При этом входное сопротивление ДУ относительно зажимов a , b определяется только активным

сопротивлением катушек. Подобная ИСх известна в литературе под названием «мост Блумлейна» [69]. Поскольку напряжения на плечах моста в момент $t=0$ определяются только индуктивностями и не зависят от активных сопротивлений цепи, то без учета собственных емкостей катушек датчика и ДУ при $L'_k = L''_k = L_k$ напряжение на выходе ИСх

$$U_{\text{вых}}|_{t=0} = U'_k|_{t=0} - U''_k|_{t=0} = L_k \cdot \left(\left. \frac{di'}{dt} \right|_{t=0} - \left. \frac{di''}{dt} \right|_{t=0} \right) = 2E \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_0}{L_k} \left[1 - \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right)^2 \right]},$$

где U'_k и U''_k - напряжения на индуктивностях L'_k и L''_k соответственно. Если $\Delta L/L_0 \ll 1$ и $L_k \gg L_0$, то

$$U_{\text{вых}}|_{t=0} \approx 2E \frac{\Delta L}{L_0}$$

Из полученных выражений видно, что мост Блумлейна обеспечивает практически линейное преобразование, причем нестабильность индуктивности L_k не оказывает заметного влияния на результат преобразования [69].

В тех случаях, когда отсутствует возможность получения противоположных по знаку изменений эквивалентных индуктивностей в ОВТД' и ОВТД'' (например, при измерении РЗ (Y) между статором и торцами лопаток ротора), один из датчиков (например, ОВТД') используется как рабочий (его эквивалентная индуктивность $L'_d = L_0 + \Delta L$), а второй (ОВТД'') – в качестве компенсационного (его эквивалентная индуктивность $L''_d = L_0$ не зависит от изменений РЗ, но подвержена аналогичным влияниям мешающих факторов и, в первую очередь, температуры).

При этом, как показано в [58] характер зависимости $U_{\text{вых}}|_{t=0}$ от изменений индуктивности остается аналогичным, но чувствительность ИСх уменьшается вдвое

$$U_{\text{вых}}|_{t=0} \approx E \frac{\Delta L}{L_0}.$$

В реальных схемах увеличение L_k приводит к усилению влияния межвитковых паразитных емкостей ДУ, которые оказываются значительно больше собственных емкостей датчиков. Переходный процесс в измерительной цепи становится колебательным, а за результат преобразования принимается первый максимум полуволны выходного напряжения (рис. 2.8). Когда датчик удален от ДУ, эквивалентная емкость включает в себя емкость линии связи, и ее влияние возрастает.

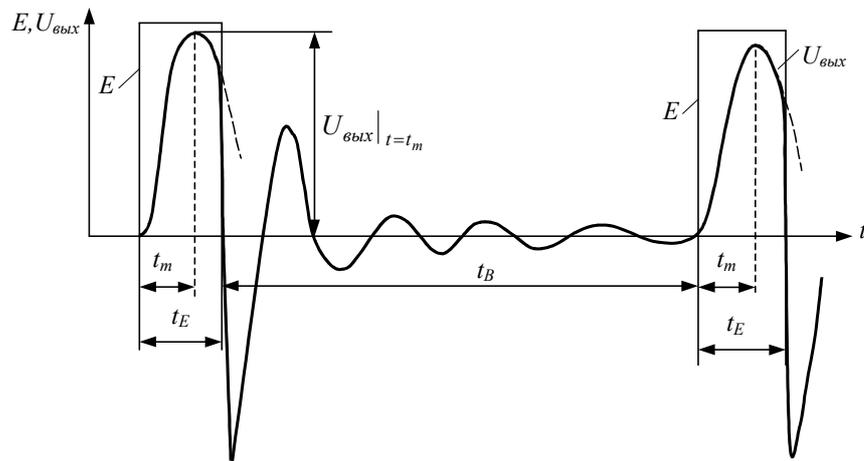


Рис. 2.8. Вид выходного сигнала на этапах преобразования и восстановления ИСх

В зависимости от параметров ОВТД, ДУ и длины линии время t_m изменяется почти на порядок. Например, в ИСх с датчиками, предназначенными для измерения РЗ между торцами лопаток и статором лопаточной силовой установки, изменение длины линии от 1 м до 30 м приводит к изменениям t_m от 0.1 мкс до 1 мкс и более. С увеличением длины линии возрастает и длительность рассеяния энергии, накопленной в ИСх в процессе преобразования (за время импульса питания t_E). Для восстановления ИСх необходимо ее возвращение к нулевым или близким к нулевым начальным условиям. Время восстановления составляет около 1 мкс при длине линии порядка 1 м и возрастает до 30 мкс при длине линии около 30 м. Это означает, что частота повторения импульсов питания в зависимости от места расположения преобразователя сигналов ОВТД может изменяться от десятков до тысячи кГц. Причем верхний частотный предел существенно перекрывает все известные задачи измерения МП ЭК силовых установок обоих классов.

Дифференциальная измерительная цепь, представленная на рис. 2.7, получила наибольшее распространение в системах измерения, описание которых приведено в разделе 4. Вместе с тем, создание новых разновидностей систем измерения происходит на фоне существенного прогресса электронной элементной базы и, в частности, операционных усилителей (ОУ). Современные ОУ отличаются высоким быстродействием, малым дрейфом нуля и низким уровнем помех, что особенно значимо при создании ДУ на их основе.

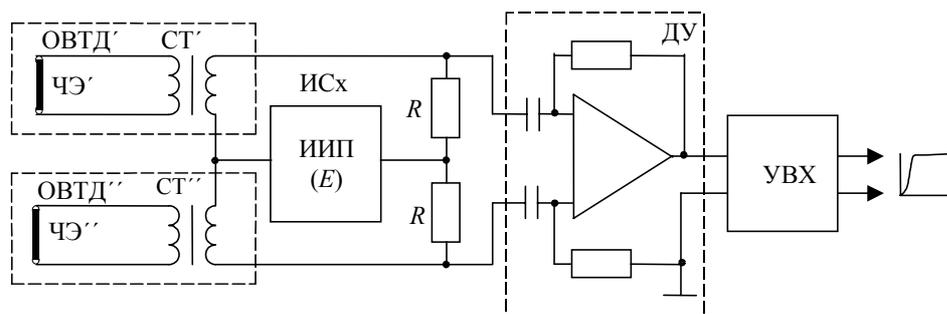


Рис. 2.9. Дифференциальная измерительная цепь с операционным усилителем в качестве ДУ.

Измерительная цепь на рис. 2.9 отличается использованием операционного усилителя в качестве ДУ вместо катушек индуктивности с тесной магнитной связью, выполняющих те же функции в схеме на рис. 2.7. Использование операционных усилителей создает перспективу миниатюризации измерительной цепи, которая в интегральном виде может быть размещена в датчике или встроена в линию связи на коротком расстоянии от датчиков. Остальные элементы измерительной цепи (ОБТД, ИИП и УВХ) остаются без изменений. Исключение составляет ИСх с токовыми шунтами (R), на которых формируются напряжения, пропорциональные токам в датчиках (на входах ДУ).