

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОГО КАСКАДА
ДИСКРЕТНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА
ЗАБОЙНОГО МОДУЛЯ ТЕЛЕСИСТЕМЫ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КАНАЛОМ СВЯЗИ
НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ**

Старцев А.Э., Ягубов З.Х.

*Ухтинский государственный технический университет
email:andstar_aes@mail.ru*

В статье рассмотрены вопросы упрощения анализа режимов работы забойных формирователей сигнала, применительно к буровым телесистемам с электромагнитным каналом связи. Показано, что линейная непрерывная модель, полученная на основе метода переменных состояния с последующим усреднением, позволяет качественно оценивать работу дискретного формирователя синусоидального сигнала, используя аппарат передаточных функций.

Ключевые слова: буровая телесистема, электромагнитный канал связи, забойный передатчик, широтно-импульсная модуляция, линеаризованная модель, передаточная функция.

Процесс передачи информации с забоя скважины на поверхность посредством электромагнитных волн в любой физической среде сопровождается затуханием сигнала из-за его отражения и рассеивания. Кроме того, любой канал связи подвержен влиянию помех. Поэтому соотношение сигнала/шум является одной из основных характеристик любой телесистемы. По определению, увеличение отношения сигнал/шум может производиться, по крайней мере, двумя путями: первый – увеличить амплитуду сигнала на забое и второй – снизить шум в канале связи и на входе приёмника. Очевидный и эффективный путь увеличения амплитуды электромагнитного сигнала связан с энергозатратами, т.е. чем большая мощность может быть направлена на излучение, тем большее значение сигнал/шум может быть достигнуто. С этой точки зрения забойный генератор является основным элементом, обеспечивающим эффективность телесистемы.

Этот элемент из-за наличия в нём вращающихся частей (статора и ротора), в условиях высоких давлений, вибраций и температур, в агрессивной и абразивной среде бурового раствора, наиболее ненадежен и недостаточно технологичен.

Кроме того, для его замены необходимо производить спускоподъемные операции, что уменьшает скорость проходки скважины и увеличивает ее стоимость.

Другим перспективным решением на сегодняшний день является замена генератора на аккумуляторное электропитание, которая, априори, должна привести к качественному росту эффективности телесистемы за счет повышения надёжности, снижения эксплуатационных расходов и трудозатрат. Однако, успешный переход на аккумуляторные батареи подразумевает кардинальные изменения в конструкции телесистемы и должен базироваться на новых принципах, технологиях и материалах.

Поскольку, аккумуляторные батареи могут развивать требуемую мощность только на ограниченном временном интервале, то одна из основных задач проектирования телесистем состоит в достижении оптимального компромисса между габаритами (аккумуляторов), мощностью излучения и длительностью непрерывной работы на забое (без подзарядки).

Современные аккумуляторы при небольшом объеме могут обеспечить длительность автономной работы забойного блока между подзарядками до 250 часов на скорости передачи информации 5 - 6 бит/сек., и частоте обновления забойной информации до нескольких раз в минуту, электрическую мощность излучения передатчика 1,5 - 2 Вт.

Очевидно, что повышая КПД передатчика, можно в значительной мере увеличить срок службы автономных источников энергии.

КПД забойного передатчика определяется в основном эффективностью работы его выходного каскада. Повышение КПД выходного каскада возможно путем перевода его из аналогового в ключевой режим. Минимальное значение тактовой частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) формирователя может быть определено исходя из допустимых массогабаритных требований к фильтру низких частот, на котором выделяется аналоговая составляющая передаваемого сигнала. При этом минимум тактовой частоты соответствует минимуму динамических потерь в ключевом каскаде, которые и определяют эффективность работы ключевых элементов.

Выходной каскад и фильтр низких частот, на который он нагружен, должны быть спроектированы таким образом, чтобы сохранялись основные параметры

работы каскада во всем допустимом диапазоне изменения входного сопротивления излучающего элемента, которое может значительно изменяться в зависимости от проводимости разбуриваемого пласта.

Реализация забойного устройства передачи информации на основе дискретного формирователя синусоидальных колебаний с широтно-импульсной модуляцией позволяет значительно повысить КПД канала передачи информации с забоя скважины на поверхность в широком диапазоне изменения мощности выходного сигнала, это позволяет осуществлять регулирование мощности забойного передатчика в функции глубины скважины с целью увеличения срока его автономной работы.

Однако анализ работы любого ШИМ формирователя осложняется тем, что структурно он включает в себя дискретную нелинейную часть (ключевой каскад) и непрерывную линейную часть (фильтр низких частот). Это значительно осложняет процесс получения качественных характеристик ШИМ формирователя, выбора и расчета корректирующих обратных связей, учета влияния на его работу различных возмущающих воздействий.

Исходя из вышеизложенного, задача построения непрерывной линеаризованной модели ШИМ формирователя синусоидальных колебаний при точном определении границ ее применения является актуальной.

Метод переменных состояния (пространства состояний) применительно к ШИМ формирователю синусоидальных колебаний позволяет получить его линейную модель для различных интервалов времени, характеризующихся определенным состоянием ключевых элементов.

ШИМ формирователь описывается как минимум двумя системами дифференциальных уравнений. Каждой из систем сопоставлены в матричной форме свои матрицы коэффициентов переменных состояния и матрицы коэффициентов внешнего воздействия. Состояние системы описывается следующими уравнениями в матричной форме [1]:

$$\|\dot{x}\| = \|A'\| \cdot \|x\| + \|B'\| \cdot \|E\| \quad \text{на интервале } 0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}, \quad (1)$$

$$\|\dot{x}\| = \|A''\| \cdot \|x\| + \|B''\| \cdot \|E\| \quad \text{на интервале } \hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1, \quad (2)$$

где $\hat{\tau}_{u1} = \tau_{u1}/T$ – нормированная длительность открытого состояния ключа или коэффициент заполнения импульса;

T – период тактовой частоты ШИМ;

$\|A'\|$ – матрица коэффициентов переменных состояния на интервале времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}$;

$\|A''\|$ – матрица коэффициентов переменных состояния на интервале времени $\hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1$;

$\|B'\|$ – матрица коэффициентов внешнего воздействия на интервале времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}$;

$\|B''\|$ – коэффициентов внешнего воздействия на интервале времени $\hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1$.

Рассмотрим в качестве примера выходной каскад формирователя, реализующего режим трехуровневой ШИМ (рис. 1). На основании законов Кирхгофа для мгновенных значений запишем выражения, описывающие состояние выходного каскада для двух интервалов времени при формировании забойным передатчиком положительной полуволны синусоидального сигнала:

а) VT2, VT3 разомкнуты, VT1 – замкнут, VT4 – коммутируется тактовой частотой (т.е. в течение времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}$ – замкнут) ;

б) VT2, VT3 разомкнуты, VT1 – замкнут, VT4 – коммутируется тактовой частотой (т.е. в течение времени $\hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1$ – разомкнут).

На основании законов Кирхгофа (рис. 1), для первого интервала времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}$:

$$\begin{cases} i_L(t) - \frac{u_C(t)}{R_H} - C \frac{du_C(t)}{dt} = 0 \\ L \frac{di_L(t)}{dt} + u_C(t) = E \end{cases} \quad (3)$$

Для второго интервала времени $\hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1$:

$$\begin{cases} i_L(t) - \frac{u_C(t)}{R_H} - C \frac{du_C(t)}{dt} = 0 \\ L \frac{di_L(t)}{dt} + u_C(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Матрицы по методу переменных состояния для двух интервалов времени, считая все элементы выходного каскада идеальными:

1. для интервала времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}$:

$$\|A'\| = \begin{Bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/(R_H C) \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

$$\|B'\| = \begin{Bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

2. для интервала времени $\hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1$:

$$\|A''\| = \begin{Bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/(R_H C) \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

$$\|B''\| = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

При формировании отрицательной полуволны сигнала забойного излучателя, учитывая, что направление тока в дросселе фильтра будет определяться полярностью включения источника питания забойного блока, и, следовательно, изменится на противоположное, уравнения по методу переменных состояния будут выглядеть так же, как и для положительной полуволны (3), (4). При этом в интервале времени $0 \leq \hat{t} \leq \hat{\tau}_{u1}$ ключи VT1, VT4 разомкнуты, VT2 – замкнут, VT3 – замкнут, а в интервале времени $\hat{\tau}_{u1} \leq \hat{t} \leq 1$ – VT1, VT4 разомкнуты, VT2 – замкнут, VT3 – разомкнут.

Таким образом, анализ режима работы забойного ШИМ формирователя синусоидальных колебаний за оба такта может быть осуществлен на основании уравнений (3), (4). Следовательно, и выражения для матриц коэффициентов по методу переменных состояния (5), (6), (7), (8) являются универсальными для анализа режима работы выходного каскада забойного излучателя, т.е. на их основании возможно получение непрерывной модели забойного ШИМ формирователя синусоидального сигнала.

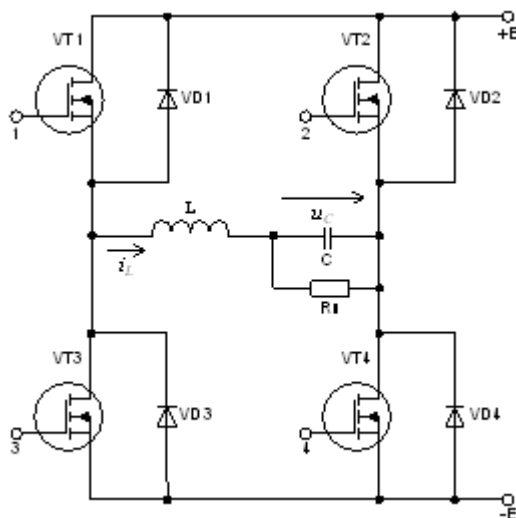


Рисунок 1. Мостовая схема оконечного каскада двухтактного усилительного каскада, реализующая режим трехуровневой ШИМ

Построение непрерывной линеаризованной модели ШИМ преобразователей

При расчете как установившихся, так и переходных процессов в дискретных формирователях эффективное применение находит метод усреднения с последующей линеаризацией усредненных параметров[2].

Каждая система уравнений (1), (2) справедлива только на своем временном интервале и является математической моделью дискретной системы, что позволяет произвести усреднение обеих систем и сведение их в одну, представленную в виде суммы уравнений (1) и (2) умноженных на нормированную длительность действия каждого из уравнений, где нормированная длительность закрытого состояния ключа определяется выражением $(1 - \hat{\tau}_{u1})$ и значит:

$$\begin{aligned} \|\dot{x}\| &= \hat{\tau}_{u1} \cdot (\|A'\| \cdot \|x\| + \|B'\| \cdot \|E\|) + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot (\|A''\| \cdot \|x\| + \|B''\| \cdot \|E\|) = \\ &= (\hat{\tau}_{u1} \|A'\| + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \|A''\|) \cdot \|x\| + (\hat{\tau}_{u1} \|B'\| + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \|B''\|) \cdot \|E\| \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (9) характеризует систему как непрерывную, где под $\|\dot{x}\|$ подразумевается усредненный вектор переменных состояния и где коэффициент заполнения импульса $\hat{\tau}_{u1}$ есть величина непрерывная.

Для получения линейной модели ШИМ преобразователя разложим уравнение (9) в ряд Тейлора. Запишем одно из уравнений системы (9):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot a''_{11}) \cdot x_1 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot a''_{12}) \cdot x_2 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot b''_{11}) \cdot E_1 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot b''_{12}) \cdot E_2 + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда разложение в ряд Тейлора функции \dot{x} , описываемой уравнением (10) с учетом только первых производных, где индекс "0" соответствует значениям переменных функции $\dot{x}_1 = \dot{x}_1(x_1, x_2, \dots, E_1, E_2, \dots, \hat{\tau}_{u1})$ в произвольной точке "0" в окрестностях которой производится разложение функции в ряд Тейлора, запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot x_{1,0} + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot x_{2,0} + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot E_{1,0} + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot E_{2,0} + \dots + \\ & + (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot \frac{\delta x_1}{\delta x_1} \cdot \Delta x_1 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot \frac{\delta x_{2,0}}{\delta x_1} \cdot \Delta x_1 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot \frac{\delta E_{1,0}}{\delta x_1} \cdot \Delta x_1 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot \frac{\delta E_{2,0}}{\delta x_1} \cdot \Delta x_1 + \dots + \\ & + (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot \frac{\delta x_{1,0}}{\delta x_2} \cdot \Delta x_2 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot \frac{\delta x_2}{\delta x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot \frac{\delta E_{1,0}}{\delta x_2} \cdot \Delta x_2 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot \frac{\delta E_{2,0}}{\delta x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \\ & + (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot \frac{\delta x_{1,0}}{\delta E_1} \cdot \Delta E_1 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot \frac{\delta x_{2,0}}{\delta E_1} \cdot \Delta E_1 + \dots + \\ & + (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot \frac{\delta x_{1,0}}{\delta E_2} \cdot \Delta E_2 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot \frac{\delta x_{2,0}}{\delta E_2} \cdot \Delta E_2 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot \frac{\delta E_1}{\delta E_1} \cdot \Delta E_1 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot \frac{\delta E_{2,0}}{\delta E_1} \cdot \Delta E_1 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot \frac{\delta E_{1,0}}{\delta E_2} \cdot \Delta E_2 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot \frac{\delta E_2}{\delta E_2} \cdot \Delta E_2 + \dots + \\ & + \frac{\delta (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot a''_{11})}{\delta \hat{\tau}_{u1}} \cdot x_{1,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \frac{\delta (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot a''_{12})}{\delta \hat{\tau}_{u1}} \cdot x_{2,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \dots + \\ & + \frac{\delta (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot b''_{11})}{\delta \hat{\tau}_{u1}} \cdot E_{1,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \frac{\delta (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (1 - \hat{\tau}_{u1}) \cdot b''_{12})}{\delta \hat{\tau}_{u1}} \cdot E_{2,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \dots + \end{aligned}$$

Очевидно, что выражение

$$\begin{aligned} & (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot x_{1,0} + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot x_{2,0} + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot E_{1,0} + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot E_{2,0} \end{aligned} \quad - \text{это значе-}$$

ние функции \dot{x}_1 в точке "0" т.е. $\dot{x}_{1,0}$.

Следовательно, разность $\dot{x}_1 - \dot{x}_{1,0} = \Delta \dot{x}_1$ является приращением функции $\dot{x}_1 = \dot{x}_1(x_1, x_2, \dots, E_1, E_2, \dots, \hat{\tau}_{u1})$, а также учитывая то, что коэффициенты $\frac{\delta x_{2,0}}{\delta x_1}$, $\frac{\delta E_{1,0}}{\delta x_1}$, $\frac{\delta E_{2,0}}{\delta x_1}$, $\frac{\delta x_{1,0}}{\delta x_2}$, $\frac{\delta E_{1,0}}{\delta x_2}$, $\frac{\delta E_{2,0}}{\delta x_2}$, $\frac{\delta x_{1,0}}{\delta E_2}$, $\frac{\delta x_{2,0}}{\delta E_2}$, $\frac{\delta x_{1,0}}{\delta E_2}$, $\frac{\delta x_{2,0}}{\delta E_2}$, $\frac{\delta E_{2,0}}{\delta E_1}$, $\frac{\delta E_{1,0}}{\delta E_2}$, равны нулю, получим:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 = & (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot \Delta x_1 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot \Delta x_2 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot \Delta E_1 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot \Delta E_2 + \dots + \\ & + (a'_{11} - a''_{11}) \cdot x_{1,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + (a'_{12} - a''_{12}) \cdot x_{2,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \dots + (b'_{11} - b''_{11}) \cdot E_{1,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \\ & + (b'_{12} - b''_{12}) \cdot E_{2,0} \cdot \Delta \hat{\tau}_{u1} + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем полученное уравнение в приращениях (11) в традиционном виде, учитывая, что выражения $\dot{x}_1, x_1, x_2, \dots, E_1, E_2, \dots, \hat{\tau}_{u1}$ являются приращениями этих переменных:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & (a'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{11}) \cdot x_1 + (a'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot a''_{12}) \cdot x_2 + \dots + \\ & + (b'_{11} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{11}) \cdot E_1 + (b'_{12} \cdot \hat{\tau}_{u1,0} + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot b''_{12}) \cdot E_2 + \dots + \\ & + (a'_{11} - a''_{11}) \cdot x_{1,0} \cdot \hat{\tau}_{u1} + (a'_{12} - a''_{12}) \cdot x_{2,0} \cdot \hat{\tau}_{u1} + \dots + (b'_{11} - b''_{11}) \cdot E_{1,0} \cdot \hat{\tau}_{u1} + \\ & + (b'_{12} - b''_{12}) \cdot E_{2,0} \cdot \hat{\tau}_{u1} + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Обобщая, и переходя к матричной форме записи, получим:

$$\begin{aligned} \|\dot{x}\| = & (\hat{\tau}_{u1,0} \cdot \|A'\| + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot \|A''\|) \cdot \|x\| + \\ & + (\hat{\tau}_{u1,0} \cdot \|B'\| + (1 - \hat{\tau}_{u1,0}) \cdot \|B''\|) \cdot \|E\| + \\ & + \hat{\tau}_{u1} \cdot (\|A'\| - \|A''\|) \cdot \|x_0\| + (\|B'\| - \|B''\|) \cdot \|E_0\| \end{aligned} \quad (13)$$

Выражение (13) используем для получения передаточных функций ШИМ формирователя, как для непрерывной линейной системы.

Учитывая что, из (5) и (7) $\|A'\| = \|A''\|$, $\|B''\| = 0$, а $\hat{\tau}_{u1,0} = 0$ (в режиме двухтактной ШИМ с нулевой начальной длительностью импульса), получим:

$$\|\dot{x}\| = \|A'\| \cdot \|x\| + \hat{\tau}_{u1} (\|B'\|) \|E_0\|. \quad (14)$$

После выполнения необходимых преобразований и, учитывая, что $\|E\|$ не является в нашем случае функционалом независимых переменных, получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{LC}(t)}{dt} = -\frac{u_C(t)}{L} + \hat{\tau}_{u1} \frac{E}{L} \\ \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C} - \frac{u_C(t)}{R_H \cdot C} \end{cases} \quad (15)$$

В операторной форме

$$\begin{cases} pI_L(p) = -\frac{U_C(p)}{L} + \frac{T_{u1}(p)}{T} \cdot \frac{E}{L} \\ pU_C(p) = \frac{I_L(p)}{C} - \frac{U_C(p)}{R_H \cdot C} \end{cases}, \quad (16)$$

где $U_C(p)$ – изображение по Лапласу напряжения на нагрузке $u_C(t)$;

$I_L(p)$ – изображение по Лапласу тока дросселя $i_L(t)$;

$T_{u1}(p)$ – изображение по Лапласу непрерывной функции длительности открытого состояния ключей $\tau_{u1}(t)$;

T – период тактовой частоты ШИМ.

В качестве примера рассмотрим методику оценки влияния ЭДС автономного источника забойного модуля телесистемы на основную гармонику передаваемого сигнала, поскольку автономный забойный излучатель, получающий энергию от аккумуляторных батарей, работает в режиме постепенного их истощения, сопровождающимся непрерывным уменьшением ЭДС аккумуляторных батарей.

Анализ произведем на основании непрерывной линеаризованной модели ШИМ (14). Передаточная функция по напряжению основной гармоники на выходе ШИМ генератора, с учетом того, что в непрерывной линеаризованной модели величины $\tau_{u1}(t)$ и $u_C(t)$ непрерывные и изменяются по синусоидальному закону:

$$W_U(p) = \frac{U_C(p)}{T_{u1}(p)} = \frac{E}{T} \cdot \left(\frac{1}{p^2 CL + p \frac{L}{R_H} + 1} \right). \quad (17)$$

Выражение (17), в котором величина $\left(\frac{1}{p^2 CL + p \frac{L}{R_H} + 1} \right)$ – передаточная

функция по напряжению фильтра низких частот ШИМ генератора, позволяет сделать вывод о том, что значение передаточной функции $W_U(p)$ будет неизменным при соблюдении условия

$$\frac{E}{T} = const. \quad (18)$$

Следовательно, для компенсации изменения напряжения гальванического источника энергии в процессе бурения, в структуру забойного ШИМ генератора необходимо включить канал компенсации возмущающего воздействия, чтобы

соблюдалось условие (18), наличие которого обеспечит увеличение тактовой частоты ШИМ при уменьшении ЭДС источника питания.

В свою очередь увеличение тактовой частоты ШИМ не должно сопровождаться увеличением коэффициента гармоник генератора, а также снижением его КПД в условиях изменяющейся амплитуды выходного сигнала.

Таким образом, записав в операторной форме систему дифференциальных уравнений, полученных согласно выражению (13), т.е. произведя над ней преобразование Лапласа можно получить передаточные функции относительно любой из двух переменных данной системы. Это позволяет использовать для анализа ШИМ преобразователя способы, разработанные для непрерывных линейных систем.

Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.Е. Основы теории цепей: Учебник для вузов; Под ред. Бакалова В.П. - 2-е изд. - М.: Радио и связь, 2000. - 592 с.
2. Коржавин В.А. Динамические характеристики импульсных полупроводниковых преобразователей и стабилизаторов постоянного напряжения. Учебное пособие для вузов.-М.: Радио и связь, 1997. - 300 с.