

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.314.58

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – СОЕДИНИТЕЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ – ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

В.А. Ажнакин  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)  
В.Г. Яцук  
(ОАО «НИИЭМ»)

*Рассматриваются волновые процессы, возникающие в системе управления приводами органов регулирования системы управления и защиты водо-водяных энергетических реакторов АЭС, приведены экспериментальные данные, а также предложено техническое решение, позволяющее устранить негативное влияние волновых процессов.*

**Ключевые слова:** волновые процессы, преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, электродвигатель, шаговый двигатель, волновой фильтр.

В настоящее время в области атомной энергетики актуален вопрос модернизации системы управления и защиты (СУЗ) реакторов с целью продления срока эксплуатации существующих энергоблоков.

В состав системы управления приводами органов регулирования (ОР) СУЗ входят преобразователи частоты, предназначенные для обеспечения питания электродвигателей (ЭД) указанных приводов. Преобразователи частоты выполняются с использованием современных силовых полупроводниковых приборов. Одной из отличительных характеристик современных силовых полупроводниковых приборов является их быстроедействие по сравнению с используемыми ранее силовыми полупроводниками. Время переключения современных силовых полупроводников составляет от нескольких сотых микросекунды до нескольких десятков микросекунд, тогда как время переключения ранее используемых приборов составляло несколько миллисекунд. Такое снижение времени переключения полупроводниковых элементов позволило выполнять преобразователи частоты на базе автономных инверторов напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией на высокой частоте коммутации ключевых приборов (от нескольких килогерц до нескольких сотен килогерц). Применение широтно-импульсной модуляции с высокой частотой коммутации силовых полупроводников позволяет снизить размеры преобразователя и увеличить его КПД.

Целью данной работы является исследование волновых процессов в системе преобразователь частоты – соединительный кабель – электрический двигатель, а также подбор параметров волнового фильтра, позволяющего убрать перенапряжения.

Преобразователь частоты подключается к электродвигателю посредством соединительного кабеля длиной от 100 до 150 м. Малое время

переключения полупроводниковых элементов негативно проявляется в волновых процессах в цепи преобразователь частоты – соединительный кабель – электродвигатель, в результате чего на зажимах электродвигателя образуются двукратные перенапряжения (в сравнении с выходным напряжением преобразователя частоты). Перенапряжения ухудшают условия изоляции обмоток двигателя. Подобные скачки напряжения могут сократить срок службы электродвигателя до нескольких месяцев.

Выходное напряжение преобразователя частоты представляет собой высокочастотную последовательность трапецеидальных импульсов в общем случае различной полярности и длительности с одинаковой амплитудой  $U_d$  – величиной постоянного напряжения на входе АИН. Крутизна  $t_f$  фронтов импульсов напряжения определяется скоростью переключения силовых ключей АИН. Прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает волновые процессы в кабеле, приводящие к появлению перенапряжений на зажимах двигателя.

Согласно теории цепей [1], кабель следует рассматривать как однородную длинную линию с распределёнными параметрами, элементарный участок которой показан на рис. 1.

Волновое сопротивление  $Z_0$  кабеля определяется последовательной индуктивностью  $L_k$  и параллельной ёмкостью  $C_k$  участка линии, последовательным активным сопротивлением  $r_k$  и параллельной активной проводимостью  $g_k$  можно пренебречь [2]:

$$Z_0 = \sqrt{L_k / C_k}.$$

Входное сопротивление  $Z_1$  кабеля представлено выходным сопротивлением полупроводниковых ключей и внутренним сопротивлением

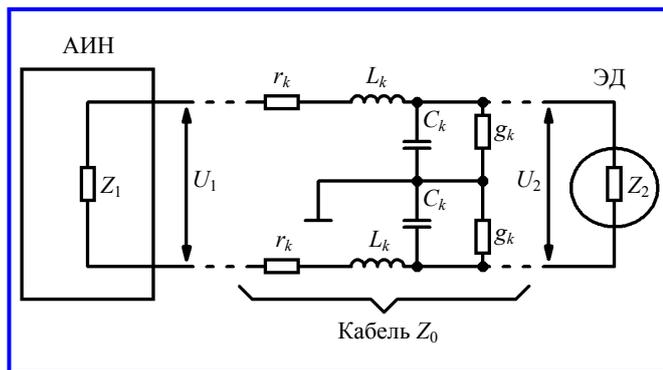


Рис. 1. Цепь соединения АИН с ЭД (эквивалентная схема элементарного участка кабеля)

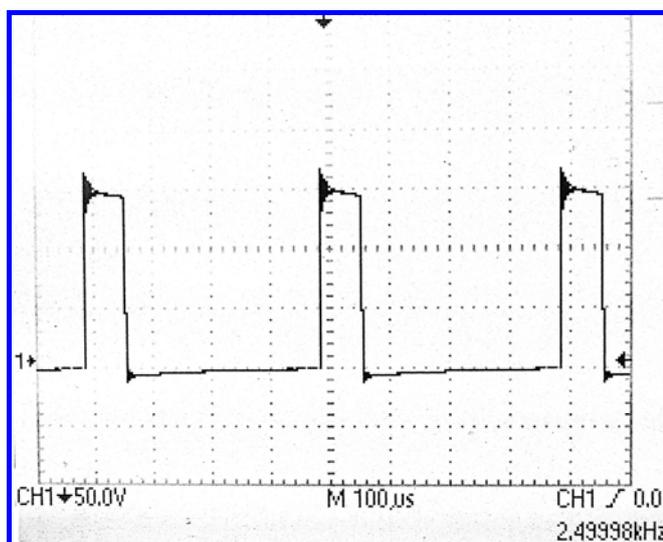


Рис. 2. Выходное напряжение АИН

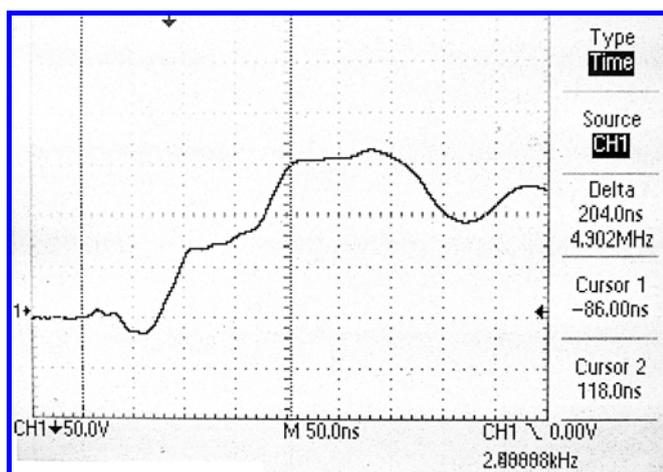


Рис. 3. Передний фронт импульса напряжения на выходе АИН

конденсаторов входного фильтра и является относительно малой величиной. Выходным сопротивлением  $Z_2$  кабеля является относительно большее для высокочастотного сигнала входное сопротивление

ЭД, определяемое индуктивностью рассеяния его обмоток и эквивалентной частотой фронта импульса напряжения.

При прохождении крутого фронта импульса напряжения входная часть кабеля (сторона АИН) работает в режиме короткого замыкания, выходная часть кабеля (зажимы ЭД) – в режиме холостого хода (так как  $Z_1 \ll Z_0 \ll Z_2$ ). С учётом значений параметров волновые характеристики кабеля приближаются к характеристикам линии без искажений и потерь:

$$\omega_f L_k \gg r_k, \omega_f C_k \gg g_k; r_k \approx 0, g_k \approx 0,$$

где  $\omega_f$  – эквивалентная частота фронта импульса напряжения, обратно пропорциональная времени фронта импульса  $t_f$  [3]. В такой линии скорость  $V_f$  распространения фронта импульса определяется выражением:

$$V_f = 1/\sqrt{L_k C_k}.$$

Время  $T_f$  прохождения фронта импульса от выхода АИН до зажимов ЭД зависит от длины кабеля  $l$ :

$$T_f = l/V_f.$$

Если это время больше или равно времени  $t_f$  фронта импульса напряжения, то в конце кабеля из-за несогласованности с нагрузкой ( $Z_2 \gg Z_0$ ) возникает отражённая волна напряжения, которая суммируется с прямой волной напряжения, образуя стоячие волны. В результате на зажимах ЭД образуется напряжение

$$U_2 = U_1(1 + n_2),$$

где  $0 < n_2 \leq 1$  – коэффициент отражения. Максимальное значение  $n_{2\text{макс}} = 1$ . Напряжение на зажимах ЭД удваивается. Возвращаясь к началу кабеля, отражённая волна гасится малым входным сопротивлением  $Z_1 \ll Z_0$ . При  $T_f < t_f$  коэффициент отражения  $n_2$  рассчитывается по формуле:

$$n_2 = n_{2\text{макс}} \frac{T_f}{t_f}.$$

Рассмотрим конкретный пример. На Белоярской АЭС в СУЗ реактора в качестве исполнительного механизма приводов ОР используется шаговый

двигатель. Согласно паспортным данным соединительного кабеля, используемого в данной системе, последовательная индуктивность участка кабеля  $L_k = 0,28$  мкГн/м, параллельная ёмкость участка кабеля  $C_k = 200$  пФ/м. В лабораторных условиях был собран стенд, в состав которого входят преобразователь частоты и шаговый двигатель, соединённые кабелем длиной  $l = 100$  м. Напряжение питания АИН 150 В. Для удобства установлен режим работы с постоянной длительностью импульсов напряжения.

По формулам рассчитаны волновое сопротивление  $Z_0$  кабельной линии и время  $T_f$  прохождения фронта импульса напряжения для данной схемы: преобразователь – кабельная линия – электродвигатель:  $Z_0 = 37,4$  Ом,  $T_f = 748$  нс.

В среде Matlab была создана модель, состоящая из блока АИН, соединительного кабеля и шагового двигателя. На выходе АИН формируется высокочастотная последовательность трапецидальных импульсов амплитудой 150 В и временами переднего и заднего фронтов  $t_{f+}$  и  $t_{f-}$ , соответствующим временам переключений силовых ключей, используемых в преобразователе частоты для Белоярской АЭС. Параметры кабеля и шагового двигателя модели совпадают с реальными параметрами указанных элементов. Данная модель позволила убедиться в правильности теории и формул, указанных выше. Также модель позволяет варьировать такие параметры, как времена переключения силовых ключей АИН, длину и электрические характеристики соединительного кабеля, параметры шагового двигателя. Следует отметить, что диаграммы, полученные в модели, идентичны аналогичным диаграммам, полученным на лабораторном стенде.

На рис. 2 показаны импульсы напряжения на выходе АИН.

Из рис. 3 видно, что время фронта импульса  $t_f$  составляет порядка 204 нс. Таким образом  $T_f > t_f$ . Согласно вышесказанному, на зажимах шагового двигателя должны наблюдаться перенапряжения, что и подтверждают полученные осциллограммы напряжения (рис. 4 и 5).

Как видно из рис. 2, возвращаясь к началу кабеля (выход АИН), отражённая волна гасится.

Существует несколько способов снизить перенапряжение:

- применение  $L$ -фильтров, включаемых на выходе преобразователя, что позволяет снизить  $du/dt$  и изменить волновое сопротивление кабеля. Увеличение волнового сопротивления кабеля снижает коэффициент отражения волны перенапряжений,

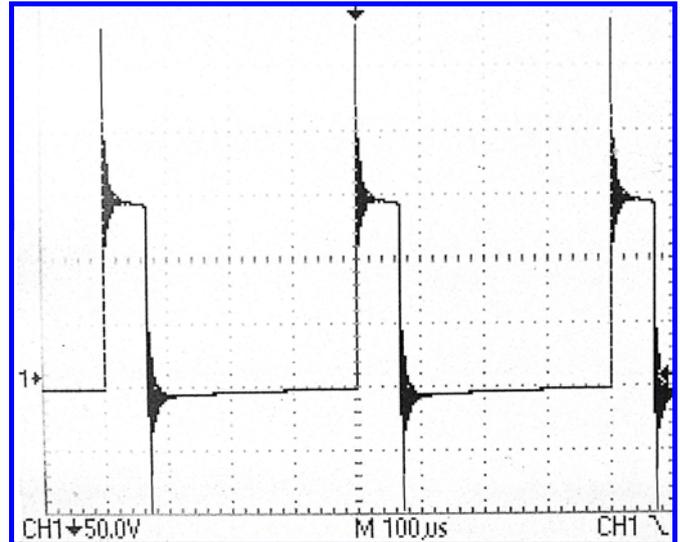


Рис. 4. Напряжение на зажимах шагового двигателя

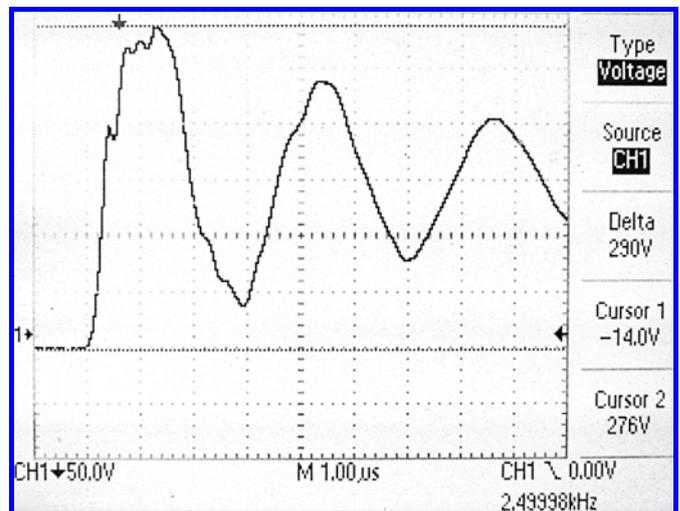


Рис. 5. Передний фронт импульса напряжения на зажимах шагового двигателя

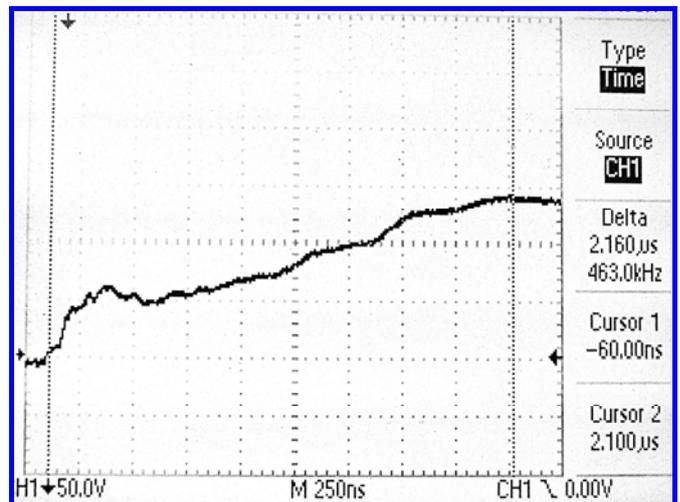


Рис. 6. Передний фронт импульса напряжения на выходе фильтра

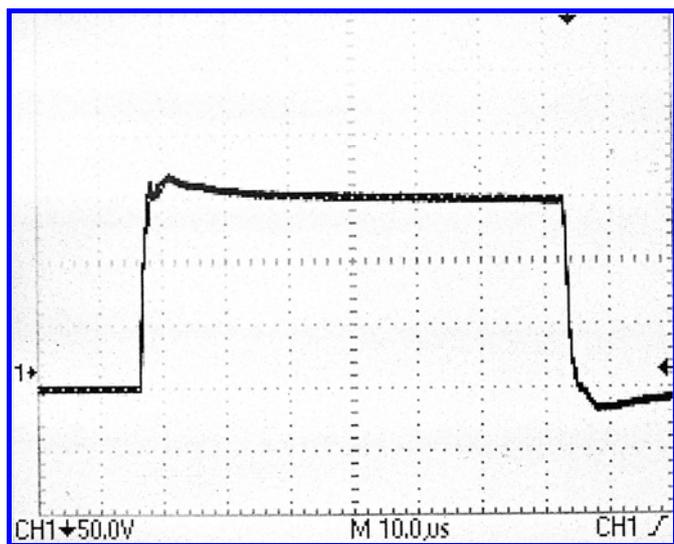


Рис. 7. Напряжение на зажимах шагового двигателя при использовании фильтра

что уменьшает величину отражённого фронта импульса и снижает напряжение на зажимах двигателя;

- установка  $RC$ -демпферов, подключаемых непосредственно к статору двигателя;
- применение  $LC$ -фильтров (или  $LCR$ -фильтров), устанавливаемых на выходе преобразователя.

Первый способ не подходит из-за сложности выполнения требуемого дросселя для устранения данной проблемы. Второй способ нельзя применить из-за отсутствия возможности установки  $RC$ -демпфера непосредственно у двигателя. В связи с этим был выбран третий способ – установка  $LCR$ -фильтра.

Разработанный волновой фильтр «затягивает» фронты импульсов выходного напряжения, делая их больше (порядка 2 мкс) времени  $T_f$  (748 нс)

распространения фронта импульса (рис. 6).

Таким образом, установленный фильтр позволяет избежать перенапряжений на зажимах шагового двигателя (рис. 7).

Начальные параметры фильтра были получены в разработанной модели Matlab. Окончательные параметры элементов фильтра определены расчётно-экспериментальным путём таким образом, чтобы величина перенапряжения была минимальна (не более 20% от величины напряжения питания АИН), потеря в фильтре, а также массогабаритных показателях. Активные потери  $LCR$ -фильтра оценивались как выделяемая мощность на резисторе. Величина выделяемой мощности имеет квадратичную зависимость от напряжения питания АИН, прямо пропорциональную зависимость от величины ёмкости конденсатора фильтра и частоты ШИМ.

В итоге исследования волновых процессов в рассматриваемой системе можно выбрать оптимальные параметры волнового фильтра, снижающего перенапряжения на зажимах электродвигателя, вызванные указанными волновыми процессами.

#### Литература

1. Круг К. А. Основы электротехники / К. А. Круг. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1946. – С. 456 – 531.
2. Шишкин С. Внешние фильтры электромагнитной совместимости частотно-регулируемого асинхронного электропривода с IGBT-инвертором / С. Шишкин // Силовая электроника. – 2006. – № 1. – С. 42 – 45.
3. Калашников Б. Е. Проблемы «длинного кабеля» в электроприводах с IGBT-инверторами / Б. Е. Калашников // Электротехника. – 2002. – № 12. – С. 24 – 26.

Поступила в редакцию 01.07.2013

*Владимир Александрович Ажнакин, ведущий инженер,  
т. (495) 366-22-00, e-mail: lab2610@mail.ru.*

*Владимир Григорьевич Яцук, д-р техн. наук, директор отделения  
преобразовательной техники и электропривода,  
т. (495) 994-55-13.*