

УДК 681.5

И.А. ФУРМАН, С.Я. БОВЧАЛЮК

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенко, Украина*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Представлена методика оценки эффективности ПЛК последовательного действия и ПЛИС-контроллера параллельного действия по совокупности параметров: быстродействию и вероятности бессбойной работы. Приведен анализ зон рационального использования контроллеров обоих типов.

ПЛИС-контролер, параллельная архитектура, вероятность бессбойной работы, быстродействие

Введение

Анализ состояния вопроса. В работах Э. А. Якбайтиса, А. Д. Закревского, и др. авторов [1, 2] были показаны значительные преимущества регулярных микроэлектронных структур при решении задач логического управления, доказана принципиальная возможность построения сверхбыстродействующих (однотактных) логических автоматов параллельного действия и создания на их основе новых высокоэффективных информационных технологий.

В [3] представлены методы и технические средства реализации информационной технологии параллельного логического управления технологическими объектами критического применения, а также показаны преимущества в быстродействии их обслуживания в сравнении с технологиями последовательного управления. Однако с учетом особых требований, предъявляемых к надежности управления объектами критического применения, главным критерием оценки указанной технологии, при использовании ее в таких объектах, следует считать вероятность бессбойной работы. Также в [3] остались не рассмотренными вопросы определения зон рационального использования классической технологий последовательного управления (на базе ПЛК после-

довательного действия) и новой технологии параллельного логического управления (на базе ПЛИС-контроллера параллельного действия).

Постановка задачи исследования. В данной статье предлагается методика оценки эффективности контроллеров последовательного и параллельного действия по совокупности параметров: быстродействию и вероятности бессбойной работы, в некоторых обобщенных координатах, в качестве которых выбраны количество входов-выходов N и длина (количество строк) L циклограммы.

Основные материалы исследования

В связи с тем, что представленные на современном рынке ПЛК последовательного действия существенно различаются по техническим характеристикам, представляется целесообразным выбрать из них наиболее характерного типопредставителя. Проведенный анализ показал, что наиболее полная и доступная для исследования документация, позволяющая провести сравнительный анализ, представлена для контроллеров Simatic компании Siemens.

В связи с чем, в качестве типопредставителя ПЛК последовательного действия был выбран контроллер Simatic S7-400.

Оценка быстродействия. Быстродействие ПЛК будем оценивать длительностью t отработки циклограммы с переменными значениями N и L , т.е.

$$t = f_i(N, L). \quad (1)$$

Численные значения t для последовательного ПЛК и ПЛИС-контроллера параллельного действия могут быть соответственно определены по формулам

$$t_{\text{посл.}} = L \cdot t_1; \quad (2)$$

$$t_{\text{пар.}} = L \cdot t_2; \quad (3)$$

где t_1 – длительность отработки одной строки циклограммы в ПЛК последовательного действия; t_2 – длительность отработки одной строки циклограммы в ПЛИС контроллере параллельного действия.

Как показано в [3], ПЛИС-контроллер параллельного действия способен обслуживать практически неограниченное количество входов-выходов за один такт автоматного времени, таким образом, длительность отработки одной строки циклограммы t_2 фактически будет зависеть лишь от частоты тактирующего генератора кристалла ПЛИС.

Для определения длительности отработки одной строки циклограммы в ПЛК последовательного действия t_1 рассмотрим в общем виде реакцию контроллера на изменение состояния входных сигналов [4], используя формулу

$$t_{\text{реак}} = t_{PII} + t_{UP} + t_{PIQ} + t_{SCC} + t_{ЗАП}, \quad (4)$$

где $t_{\text{реак}}$ – время реакции ПЛК последовательного действия; t_{PII} – длительность передачи сигнала с входа контроллера в его память; t_{UP} – длительность обработки программы пользователя; t_{PIQ} – длительность формирования выходных сигналов (команд); t_{SCC} – время, затрачиваемое на обслуживание операционной системы; $t_{ЗАП}$ – время запаздывания в модулях ввода-вывода.

По мнению автора, наиболее точно длительности отработки одной строки циклограммы t_1 соответствует максимальное время реакции контроллера [4], которое может быть рассчитано как удвоенное время реакции без учета задержек в модулях ввода-

вывода, то есть с учетом (4)

$$t_{\text{реак}}^{\text{max}} = 2 \times (t_{PII} + t_{PIQ} + t_{UP} + t_{SCC}) + t_{ЗАП}, \quad (5)$$

Поскольку модули ввода-вывода, как для ПЛК последовательного действия, так и для ПЛИС-контроллера параллельного действия имеют примерно одинаковые времена задержек $t_{ЗАП}$, то этим параметром при сравнительном анализе их быстродействия можно пренебречь.

С учетом структурной организации контроллера Simatic S7-400 для получения численных значений максимального времени реакции необходимо учесть дополнительные затраты процессорного времени на обслуживание периферийных устройств и служебных процессов операционной системы, то есть $t_{\text{реак}}^{\text{max}}$ может быть определено как удвоенное время цикла – время, необходимое операционной системе для обработки одного прогона программы

$$t_{\text{реак}}^{\text{max}} = 2 \times \left(\frac{(t_{PII+PIQ} + t_{UP} + t_{SCC}) \cdot 100}{100 - K} + t_{INT} + t_{EC} \right), \quad (6)$$

где $t_{PII+PIQ}$ – суммарное время передачи входных и формирования выходных сигналов; K – коэффициент коммуникационной загрузки; t_{INT} – время, затрачиваемое на обработку прерываний; t_{EC} – время, затрачиваемое на обработку ошибок.

В упрощенном виде время передачи входных и формирования выходных сигналов обновления (время образа процесса) может быть рассчитано как

$$t_{PII+PIQ} = t_C + t_A \cdot n + \sum t_{ITF} \cdot n, \quad (7)$$

где t_C – время основной загрузки процессора; t_A – время записи-чтения сигналов входов-выходов центрального процессорного блока; t_{ITF} – время записи-чтения сигналов входов-выходов в интерфейсных устройствах; n – число байт входного (выходного) вектора.

Длительность t_{UP} обработки программы пользователя может быть рассчитана как сумма длительностей выполнения отдельных инструкций.

Зададим ряд ограничений для контроллеров обоих типов. Так будем считать, что датчики и испол-

нительные механизмы подключаются непосредственно к центральному модулю, поэтому время t_{ITF} будет равным нулю. Также исключим из времени цикла время, затрачиваемое на обработку внешних прерываний t_{INT} и время, затрачиваемое на обработку ошибок t_{EC} , т. е.

$$t_{ITF} = 0; t_{INT} = 0; t_{EC} = 0.$$

Таким образом, максимальное время реакции контроллера Simatic S7-400 может быть рассчитано по формуле

$$t_{реак}^{\max} = 2 \times \left(\frac{(t_c + t_A \cdot n + t_{UP} + t_{SCC}) \cdot 100}{100 - K} \right). \quad (8)$$

Технические данные, необходимые для расчета значения $t_{реак}^{\max}$ для контроллера Simatic S7-400 с процессорным модулем CPU414, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры контроллера Simatic S7-400 с процессорным модулем CPU414

Обозначение параметра	Величина	Значение для расчетов
t_{SCC}	228÷276 мс	250 мс
t_c	13 мс	13 мс
t_A	1,5 мс	1,5 мс
K	5÷50%	20%

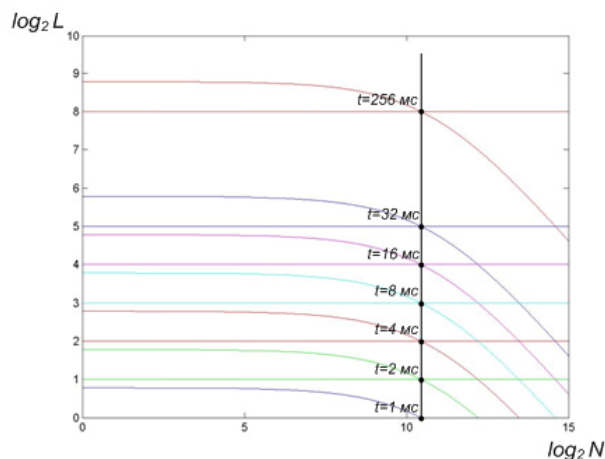
Формула (8) с учетом (2) позволяет получить аналитическое выражение для построения семейства кривых $t_i = f_i(N, L)$ для ПЛК последовательного действия, в котором также учтено побайтное обслуживание входов-выходов контроллером Simatic S7-400:

$$t_{носл.} = L \times 2 \times \frac{(t_c + t_A \times \text{int}\left(\frac{N}{8}\right) + t_{UP} + t_{SCC}) \cdot 100}{100 - K}. \quad (9)$$

При построении семейств кривых $t = f_i(N, L)$ для ПЛК последовательного действия и ПЛИС-контроллера параллельного действия зададимся фиксированным временем обработки программы пользователя $t_{UP} = 100$ мс, а также длительностью обработки одной строки циклограммы в ПЛИС-

контроллере $t_2 = 1$ мс. Подставляя фиксированные значения длительностей t обработки циклограммы в диапазоне от 1 до 256 мс в выражения (9) и (3) построены семейства кривых $t = f_i(N, L)$ для контроллеров обоих типов (рис. 1).

Оценка вероятности появления сбоев. Анализ публикаций показывает, что в основу оценки надежности работы последовательных ПЛК закладывается суммирование интенсивностей отказов λ_i компонентов, входящих в состав ПЛК. С точки зрения схемотехники ПЛИС-контроллер параллельного действия строится на элементной базе, во многом схожей с элементной базой ПЛК последовательного действия. Если учесть, что суммарное число элементов (приведенное, например, к количеству эквивалентных вентилях либо числу транзисторов) для контроллеров, как последовательного, так и параллельного действия примерно одного порядка, то, по мнению автора, использование указанной выше методики для сравнительной оценки их надежности становится неинформативным.

Рис. 1. Семейства кривых $t = f_i(N, L)$

Как было показано выше количество тактов, затрачиваемое на решение условного логического уравнения ПЛИС-контроллером параллельного действия многократно меньше, нежели число тактов, затрачиваемое ПЛК последовательного действия, из чего можно сделать предположение о том, что и вероятность появления сбоев в ПЛИС-контроллере параллельного действия должна быть значительно

ниже. Ниже предлагается вариант анализа данной гипотезы.

В общем случае вероятность бессбойной работы устройства может быть вычислена по формуле

$$P_{сб}(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (10)$$

где $P_{сб}(t)$ – вероятность бессбойной работы устройства; λ – интенсивность сбоев устройства.

Тогда, в предположении, что поток сбоев имеет экспоненциальный характер, $P_{сб}(t)$ связана с параметром λ зависимостью

$$P_{сб}(t) = e^{-\lambda t}, \quad (11)$$

Для количественной оценки вероятности бессбойной работы введем предположение о том, что интенсивность сбоев обоих указанных типов контроллеров одинакова в промежутке элементарного дискретного интервала автоматного времени – такта. Следовательно, при различном числе тактов, затрачиваемых на выполнение фиксированной задачи, существует возможность предположить что

$$\frac{\lambda_{сб посл.}}{\lambda_{сб пар.}} = \frac{N_{Тпосл.}}{N_{Тпар.}}, \quad (12)$$

где $\lambda_{сб посл.}$ – интенсивность сбоев ПЛК последовательного действия; $\lambda_{сб пар.}$ – интенсивность сбоев ПЛИС-контроллера параллельного действия; $N_{Тпосл.}$ – число тактов, затрачиваемое ПЛК последовательного действия на отработку фиксированной задачи; $N_{Тпар.}$ – число тактов, затрачиваемое ПЛИС-контроллером параллельного действия на отработку фиксированной задачи.

Поскольку число тактов, затрачиваемое ПЛИС-контроллером параллельного действия на отработку фиксированной задачи многократно меньше, чем у ПЛК последовательного действия, то введем специальный коэффициент $K_{сб}$, определяющий величину такой кратности

$$K_{сб} = \frac{N_{Тпосл.}}{N_{Тпар.}}. \quad (13)$$

Тогда с учетом (11) и (13) вероятность бессбойной работы ПЛК последовательного действия для

фиксированного времени наблюдения t может быть рассчитана как

$$P_{сб}^{посл.}(t) = e^{-\lambda \left(\frac{N_{Тпосл.}}{N_{Тпар.}} \right) t} = e^{-\lambda K_{сб} t}. \quad (14)$$

С учетом структурной организации контроллера Simatic S7-400, число тактов, затрачиваемое его процессором на обслуживание входов-выходов можно рассчитать по формуле

$$N_{Тпосл.} = N_{Т1вх-вых} \times \text{int} \left(\frac{N_{вх-вых}}{8} \right) \times 10, \quad (15)$$

где $N_{Т1вх-вых}$ – число тактов, затрачиваемое ПЛК последовательного действия на обработку одного входа или формирование сигнала на одном выходе; $N_{вх-вых}$ – суммарное количество управляемых входов-выходов ПЛК.

В [3] наглядно продемонстрирована возможность ПЛИС-контроллера параллельного действия обслуживать практически неограниченное число входов-выходов за один такт, что позволяет привести формулу (13) к виду

$$K_{сб} = N_{Тпосл.}. \quad (14)$$

Таким образом, вероятность бессбойной работы ПЛК последовательного действия для времени наблюдения t может быть определена как

$$P_{сб}^{посл.}(t) = e^{-\lambda N_{Тпосл.} t}. \quad (15)$$

Зададимся фиксированным временем наблюдения t , равным времени обработки ПЛК последовательного действия одной строки циклограммы. Тогда вероятность бессбойной работы ПЛК последовательного действия в течение времени отработки одной строки циклограммы, равна

$$P_{сб}^{посл.}(t) = \exp \left(-\lambda N_{Т1вх-вых} \times \text{int} \left(\frac{N_{вх-вых}}{8} \right) \times 10 \times \right. \\ \left. \times L \left(2 \times \frac{(t_C + t_A n + t_{UP} + t_{SCC}) 100}{100 - K} \right) \right). \quad (16)$$

Последнее выражение позволяет построить семейства кривых $P_{сб}^{посл.}(t) = f_i(N, L)$ ПЛК последовательного действия, а выражение (11) $P_{сб}^{пар.}(t) = f_i(N, L)$ ПЛИС-контроллера параллельного действия.

Для чего зададимся следующими значениями величин λ и $P_{сб}(t)$: усредненным значением λ интенсивности сбоя контроллеров различных типов – 20×10^7 ; значениями вероятностей бессбойной работы контроллеров обоих типов в диапазоне от 0,999 до 0,999999.

Построенные семейства кривых $P_{сб}(t)=f_i(N,L)$ для контроллеров обоих типов, показаны на рис. 2.

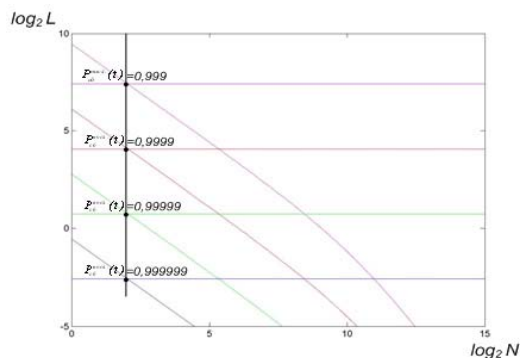


Рис. 2. Семейства кривых $P_{сб}(t)=f_i(N,L)$

Определение зоны рационального использования информационной технологии параллельного логического управления. Рассмотрим процесс построения зоны рационального применения технологии параллельного логического управления на примере сравнительного анализа быстродействия контроллеров обоих типов.

Уравнения (3) и (9) представляют собой два семейства кривых в пространстве входов-выходов N и строк циклограммы L с параметром t . Заданное фиксированное значение длительности отработки циклограммы определяет ту либо иную кривую каждого семейства. Так если $t_{носл.} < t_{нар.}$, то время обработки циклограммы у ПЛК последовательного действия меньше, чем у ПЛИС-контроллера параллельного действия, а при противоположном неравенстве – наоборот. Поэтому в случае истинности указанного неравенства координаты N и L будут определять как более предпочтительный контроллер последовательного действия, в противном случае – ПЛИС-контроллер параллельного действия. Учитывая непрерывный характер каждого семейства равенство

выражений (3) и (9), т.е.

$$t_{носл.} = t_{нар.} \Rightarrow t_{носл.} - t_{нар.} = 0, \quad (17)$$

равенство (17) будет определять границу зоны рационального использования рассматриваемых контроллеров по быстродействию. Рис. 1 иллюстрирует данное утверждение. Горизонтальные линии, построенные при фиксированных значениях длительностей отработки циклограммы – $t_{нар.}$ (3) для ПЛИС-контроллера параллельного действия, пересекаясь с соответствующим кривыми $t_{носл.}$ (9) для ПЛК последовательного действия, образуют границу зоны. Точки границы, через которые проходят кривые обоих семейств, отмечены значением времени длительности отработки циклограммы каждым из указанных типов контроллеров. Аналогичным образом построена зона рационального использования контроллеров по второму рассматриваемому параметру – вероятности бессбойной работы (рис. 2).

Наложение кривых, показанных на рис. 1 и 2 на единую координатную сетку позволяет получить зону рационального использования ПЛК последовательного действия и ПЛИС-контроллеров параллельного действия по обоим параметрам – t и $P_{сб}(t)$ (рис. 3), образованную непустым пересечением двух исходных зон, при этом зоны рационального использования отмечены штриховкой. Здесь же учтено естественное ограничение по длине циклограммы ($L \leq 1024$), которое может иметь место при управлении оборудованием.

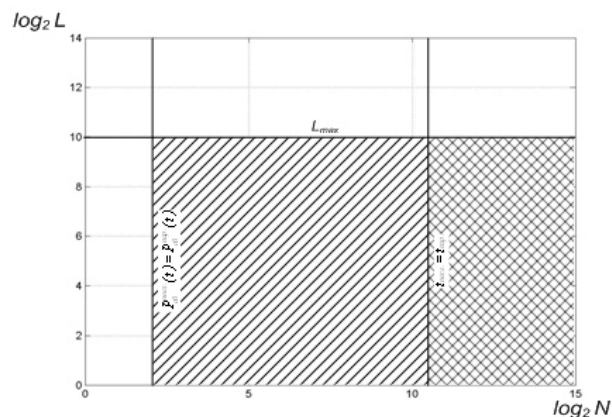


Рис. 3. Зоны рационального использования информационных технологий при $t_2=1$ мс

Как видно из рис. 3, ПЛК последовательного действия имеет преимущество перед ПЛИС-контроллером параллельного действия по вероятности бессбойной работы $P_{сб}(t)$ при незначительном числе входов-выходов (менее 4-х), а в быстродействии при числе входов-выходов достигающем значения около 1400, при этом положение границ зон практически не зависит от длины циклограммы L . Пересечение зон рационального использования контроллеров по обоим параметрам t и $P_{сб}(t)$, показанное на рис. 3 двойной штриховкой, показывает преимущество ПЛИС-контроллера параллельного действия над контроллером последовательного действия при числе входов-выходов более 1400.

Таким образом, можно было бы сделать вывод о преимуществе ПЛИС-контроллера параллельного действия лишь при количестве входов-выходов, значительно превышающем тысячу, что в современных системах управления встречается нечасто. Однако указанный результат получен при заданной длительности отработки одной строки циклограммы в ПЛИС-контроллере $t_2 = 1$ мс, т.е. фактически при частоте тактирующего генератора равной 1 кГц. Данное значение частоты явно занижено в сравнении с реально возможными частотами тактирования кристаллов ПЛИС, достигающими 10 МГц и более. Дальнейшие исследования показали, что уменьшение длительности отработки одной строки циклограммы t_2 приводит к смещению границы зоны рационального использования ПЛИС-контроллеров параллельного действия по быстродействию влево и уже при значении $t_2 = 0,5$ мс пересечения семейства кривых (3) и (9) не наблюдается, т.е. ПЛК последовательного действия имеет худшие показатели быстродействия при любых значениях N и L . График, показывающий пересечение зон рационального использования контроллеров обоих типов для рассмотренного случая показан на рис. 4.

Выводы

Таким образом, проведенная оценка эффективности использования информационной технологии

параллельного логического управления на базе ПЛИС-контроллеров параллельного действия, позволяет сделать вывод о том, что в зоне массового применения ПЛК (от 32-х входов-выходов и при длине программы от 32 до 1024 строк) ПЛИС-контроллеры параллельного действия имеют явные преимущества перед контроллерами последовательного действия.

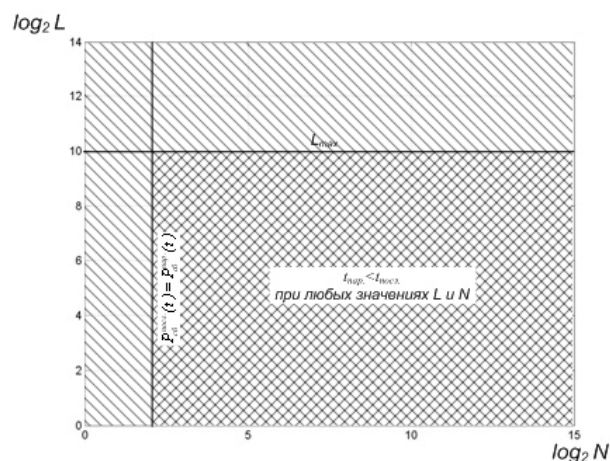


Рис. 4. Зоны рационального использования информационных технологий при $t_2 = 0,5$ мс

Литература

1. Якубайтис Э.А. Программируемый логический автомат // АВТ. – 1975. – № 5. – С. 1-5.
2. Закревский А.Д. Параллельный автомат. – Доклады АН БССР. – 1984. – Т. 28, № 8. – С. 717-719.
3. Бовчалюк С.Я. Новая информационная технология логического управления в энергетике и на транспорте // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2007. – Вип. 3 – С. 47-51.
4. Siemens Россия / Система автоматизации S7-400. Данные CPU. – М., 2007. – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.automation-drives.ru/as/products/simatic_s7/s7_400/5_Cycle&ReactionTimes_r.pdf.

Поступила в редакцию 22.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. А. Краснобаев, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.