

DOI:

ПРОБЛЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АТОМАЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Промыслов В.Г., Семенов К.В., М.Ю. Тимофеев
*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

1 Введение

Современные автоматические системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) представляет собой сложный программно-технический комплекс, состоящий из множества вычислительных компонентов, объединенных вычислительной сетью. Дополнительной характеристикой современных АСУ ТП является включение АСУ ТП объекта в глобальную информационную структуру в рамках некоторого объединения. Высокие требования к достоверности и анализируемости обрабатываемой в системе информации, требуют как синхронности работы различных компонентов системы, так и возможность соотнесения шкалы времени системы с абсолютной шкалой времени. Последнее требование особенно важно в свете тяжелых происшествий в случившихся промышленном и энергетическом комплексе РФ (Саяно-Шушенская ГЭС), когда был необходим совместный анализ как собственных данных системы, так и внешних по отношению к объекту (сторонних) систем.

Network Time Protocol (NTP) - один из наиболее распространенных сетевых протоколов синхронизации [1]. Для типичных вычислительных высокоскоростных сетей, функционирующих без потери данных и при условии применения в качестве вычислительных компонентов, компьютеров со стабильностью порядка задающего генератора в пределах 100 PPM точность взаимной синхронизации времени компонент может составлять несколько миллисекунд [2].

Система поддержания единого времени NTP, реализована в виде управляющей импульсной системы с обратной связью, поэтому для ее применения в АСУ ТП необходимо понимать, как алгоритм ее функционирования, так и связанные с этим ограничения, возможность изменения умолчательных настроек NTP для удовлетворения требований к синхронности времени конкретной реализации АСУ ТП.

В работе рассмотрен общий алгоритм функционирования NTP, но особое внимание уделено начальному периоду работы системы, возникающему после включения системы и до установления необходимого рассогласования между компонентами системы, проанализированы отличия функционирования NTP в промышленных системах по сравнению с обычными широкомасштабными вычислительными сетями (Internet).

Нами рассмотрен протокол NTP версии 3 [1]. Протокол версии 4 [2] который сейчас активно разрабатывается, реализует комбинированный алгоритм синхронизации (фазовый и частотный), и обладает потенциально лучшими характеристиками по сравнению с версией 3. Однако, из-за своего экспериментального статуса, алгоритмической сложности, затрудняющей анализ поведения системы, он не имеет решающего преимущества для промышленных АСУ ТП, многие из которых функционируют на объектах повышенной опасности и где принцип простоты реализации системы имеет решающее значение.

В работе рассмотрена математическая модель системы поддержания единого времени реализованная на основе протокола NTP. Модель позволяет оптимизировать параметры NTP для конкретной компьютерной системы. Математическая модель построена в среде MatLab. Исследуется применение альтернативного оптимального критерия с ограничением на значение квадратической ошибки, взамен реализованному в NTP критерию обеспечения гладкости амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для выбора параметров.

Для расчета максимального времени прохождения сигнала между компонентами АСУ ТП, необходимого для определения параметров NTP предложено применение вспомогательной модели АСУ ТП [12] основанной на методе «Network Calculus» [7, 8].

2 Математическая модель системы поддержания единого времени

Система поддержания единого времени компьютерной системы представляет собой систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) структурная схема приведена на (Рис. 1) где, PD - фазовый детектор, CF - фильтр выбора, LF - фильтр низкой частоты (ФНЧ),

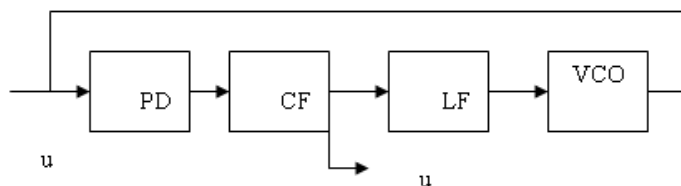


Рисунок 1 Блок схема NTP

VCO - генератор с изменяемой частотой. Детальный алгоритм функционирования каждого элемента блок схемы и их взаимосвязь полностью приведен в документе [1]. Обозначения u_{vco} применяется для выходного сигнала, а u_{ref} для входного сигнала со стороны референтного источника времени.

2.1 Передаточные функции элементов ФАПЧ

Рассмотрим более подробно передаточные функции элементов CF, LF и VCO, представленные в виде преобразований Лапласа, где s – комплексная переменная.

2.1.1 Фазовый детектор

Фазовый детектор создает напряжение на выходе пропорциональное разности фаз колебаний опорного и управляемого генератора.

При соответствующем выборе нормирующих множителей $K_{pd} = 1$.

2.1.2 Фильтр выбора

Элемент CF выполнен в виде сдвигового регистра и выполняет функцию фильтрации приходящей от референтного источника данных, путем выбора пакета с наименьшим временем задержки δ в транспортном (сетевом) уровне. Для дальнейшего анализа он может рассматриваться, как линия задержки на $T + \delta$, где T характеризует постоянную часть, связанную с размером сдвигового регистра и частотой обновления его ячеек, δ - характеризует неравномерность связанную с транспортным уровнем АСУ ТП. В большинстве промышленных систем задержка транспортного уровня $\delta < 10$ мс, в то время как обычное значение T составляет несколько минут. Поэтому, не теряя общности, возможно, аппроксимировать $K_{cf} \approx e^{-Ts}$.

2.1.3 Фильтр низкой частоты

Элемент LF реализован в виде фильтра низкой частоты (ФНЧ)

$$K_{lf} = K_{\delta i \times}$$

и в зависимости от конфигурации NTP может быть как фильтром первого, так и второго порядка с передаточными функциями:

$$K_{lf} = \left(1 + \frac{s}{\omega_L}\right)^{-1}$$

$$K_{lf} = \frac{\omega_c^2}{\tau^2 s^2} \left(1 + \frac{\tau s}{\omega_z}\right)$$

соответственно, где $\omega_L = 1/\tau$ частота среза ФНЧ, ω_c - частота перехода и

ω_z - угловая частота. Применение ФНЧ второго порядка обусловлено наличием ошибки по частоте пропорциональной $\frac{R'(t)}{2}[t]^2$, где $R'(t_0)$ - нестабильность частоты в единицу времени, что для

компенсации возмущающих воздействий требует систему с порядком астатизма не менее трех. Применение ФНЧ второго порядка, может оказаться выгодным при больших величинах τ , когда как будет показано ниже для обеспечения требуемых характеристик системы с ФНЧ первого порядка, необходимо уменьшать значения α , и как следствие ухудшать характеристики системы по точности.

Для режима установления начального захвата ФАПЧ характерны большие значения ω_L и α , т.к. статическая ошибка обратно пропорционально α , то она будет мала, а следовательно отличие в применение ФНЧ первого или второго порядка так же малы, с другой стороны система ФАПЧ с ФНЧ второго порядка обладает структурной неустойчивостью, что затрудняет ее анализ. Поэтому для дальнейшего исследования проводилось для ФАПЧ с ФНЧ первого порядка.

2.1.4 Управляемый генератор

Управляемый генератор имеет передаточную функцию в виде интегратора с коэффициентом усиления α :

$$K_{VCO} = \frac{\alpha}{s}.$$

2.2 Передаточная функция по задающему и возмущающему воздействиям

Из элементарной теории систем управления, полный коэффициент передачи по изменению в возбуждающему воздействию (u_{ref}) равен соответственно

$$(1) K_{ref} = \frac{K_{FULL}}{1 + K_{FULL}}$$

по изменению частоты управляемого генератора (u_{VCO}) равен:

$$(2) K_{ref} = \frac{K_{pd} K_{cf}}{1 + K_{FULL}}$$

где $K_{FULL} = K_{pd} K_{cf} K_{lf} K_{VCO}$.

Рассмотрим передаточные функции по изменению фазы (1) и частоты (2) при условии $K_{cf} \approx 1$, т.е. когда заведомо выполняется теорема об устойчивости систем с обратной связью [4]

$$(2.9) |K_{ref}(j\omega)| < \frac{1}{T\omega}$$

Передаточная функция (1) и (2) для системы ФАПЧ с ФНЧ первого порядка равна:

$$(3.1) K_{ref} = \frac{\alpha\tau}{\tau s^2 + s + \alpha\tau}$$

$$(3.2) K_{ref} = \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2\frac{\zeta}{\omega_n} + 1 \right)^{-1}$$

соответственно, где $\omega_n^2 = \alpha\omega_L$ и $\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_L}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$. Передаточные функции (3.1-2) представляет собой передаточные функции фильтра низкой высокой частоты.

Соотношение полос захвата $R = \alpha$ и полосы удержания R_h для системы ФАПЧ равно.

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_h}{R}} \approx 4\eta / \pi, \eta = \sqrt{\frac{\omega_L}{R}} [4]$$

Из теории фильтрации известно, что для так называемого фильтра Баттерворта должно иметь место соотношение:

$$(3.1.1) 2\alpha\tau = 1 \text{ или } \zeta = 2^{\frac{1}{2}},$$

когда обеспечивается максимально гладкая АЧХ (выброс не превышает 2.09 dB), на частоте пропускания ω_n .

Обычно для улучшения фильтрации быстрых флуктуации обеспечивается соотношение $\alpha\tau \leq 1$, при этом $\eta \leq 1, \gamma \leq 1$. Критерий обеспечения максимально гладкой АЧХ является критерием по умолчанию реализуемым в НТР для определения настраиваемых параметров (α, τ, T) . Данный критерий оправдан в общем случае, когда его применение обеспечивает приемлемые характеристики для широкого класса компьютерных системы. Однако в зависимости от требований к точности и быстродействия функционирования, полосы захвата и удержания системы, возможно применение несколько отличных критериев оптимизации. Увеличение полосы пропускания ФНЧ, ведет к улучшению быстродействия системы, однако ведет к худшей точности системы в долговременном масштабе с одной стороны, с другой стороны если постоянная времени задержки (Т) в элементе СФ фиксирована, то малое τ может привести к нестабильности системы в виду нарушения условия (2.9).

В дополнению к критерию (3.1) полезно сформулировать критерии оптимизации, где показателем оптимальности является значение функционала квадратической ошибки:

$$(3.3) I = \frac{A^2}{2\omega_n} \left(\frac{1}{2\zeta} + 2\zeta\omega_L \right)$$

где А – амплитуды функции скачка:

$$(3.4) f(t) = \begin{cases} A, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}$$

Ограничениями для задачи оптимизации функционала (3.3) является требования на сохранения устойчивости системы (уравнение 2.9) и быстродействия системы. Под мерой быстродействия системы примем максимальное значение параметра ε при котором передаточная функция системы $K(s - \varepsilon)$ является устойчивой, используя критерий устойчивости Рауса легко установить, что $\varepsilon \sim 1/\tau$.

Минимум функционала (3.3) равный $I_{\min} = \frac{A^2}{\omega_n}$ достигается при $\alpha\tau = 1$, т.е при заданном α

система оптимальная по (3.3) будет обладать лучшей точностью в смысле квадратической ошибки, но худшим быстродействием и большим выбросом по сравнению системы оптимальной по критерию (3.1.1).

Если заданы ограничения на максимум квадратической ошибки, то можно обеспечить максимально возможное быстродействия системы при заданной точности синхронизации. Нормированные АЧХ для системы (Рис.1) уравнения (1-2) приведена на Рисунке 2 для систем с параметрами $\alpha = 2^{-13}, \tau = 2^{11}, \tau = 2^{12}, \tau = 2^{13}$.

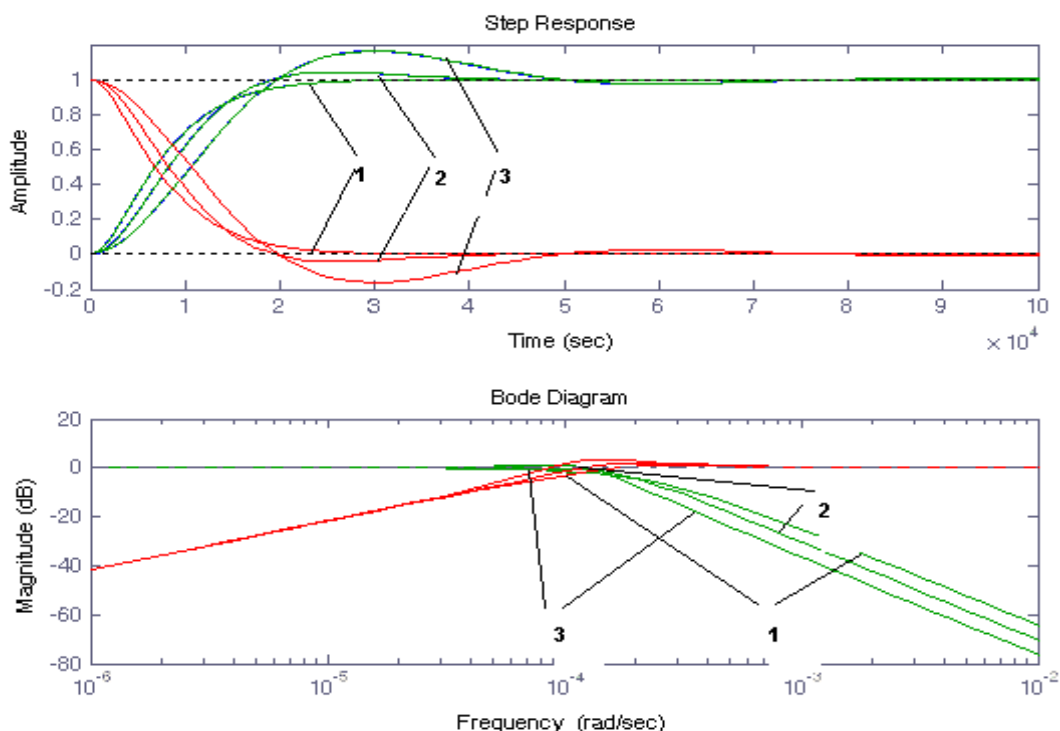


Рисунок 2 Реакция на единичный импульс и АЧХ, для систем с передаточными функциями 1,2 красная и зеленая соответственно. 1,2,3 для $\tau=2^{11}$, 2^{12} и 2^{13} соответственно

3 Расчет квадратической ошибки

Все параметры в уравнении (3.3) кроме амплитуды входного сигнала, являются задаваемыми параметрами и их определение тривиально.

Для определения параметра А возможно как прямое его измерение, так и получение его путем моделированием. Причем нас по понятным причинам интересует максимальное значение данного параметра.

Прямые измерения не обеспечивают необходимого качества выполнения функции, что определяется влиянием факторов:

- невозможностью собрать весь комплекс оборудования (часть оборудования может быть в ремонте или еще не поставлено),
- некоторые режимы работы ЛВС не достижимы в нормальном режиме эксплуатации (являясь аварийными),
- стохастический характер взаимодействия компонентов программного обеспечения АСУ ТП друг с другом, наличия сетевого оборудования приводит к тому, что сам измеряемый параметр является стохастической величиной, имеющей сложное распределение [6].

Амплитуда функции скачка при начале работы системы ФАПЧ при условии, что использован механизм однократного, прямого сведения времени клиента (команда ntpdate) равен времени необходимом на прохождение синхронизирующего пакета от сервера до клиента, плюс некоторое время необходимое для доступа к системным часам клиента (обычно последнее достаточно мало).

4 Связь параметров модели с внутренними переменными NTP

Полный алгоритм функционирования NTP имеет более сложный характер, чем описанный в п.3. Это связано с наличием в алгоритме рекуррентного обновления основных параметров системы, в зависимости от характеристик АСУ ТП, прежде всего δ и $R'(t_0)$. Однако такая упрощенная модель, хорошо соответствует режиму захвата с фазовой подстройкой частоты, реализуемого NTP во время первичной синхронизации. Для повышения быстродействия в этом режиме устанавливается относительно малое значение постоянной времени ФНЧ, $\tau \leq 64$. В установившемся режиме работы (режим удержания) происходит постепенное увеличение τ до максимального значения (обычно

$\tau_{\max} \leq 1024$ с), и начиная с $\tau > 64$ реализован алгоритм частотной коррекции [1], данный режим выходит за рамки нашего рассмотрения. При увеличении τ соответственно выбранному критерию оптимизации меняются переменные α, T .

Коэффициент усиления α связан с периодом обновления частоты внутреннего генератора уравнением $\alpha \sim B/\sigma$, обычно $B = 2^{-N}$, $N \sim 10-13$. Период обновления должен обеспечивать режим захвата и удержания ФАПЧ NTP т.е. уход частоты за время действия процедуры коррекции σ из за нестабильности локального генератора φ не должен выходить за пределы частоты удержания R , а так же гарантировать, что за время σ процедура коррекции частоты была закончена и ошибка не превышала ε .

$$\sigma \leq \frac{R\varepsilon}{\varphi(R-\varphi)} [1]$$

Для типичных параметров $R = 4 \cdot 10^{-4}$ и $\varphi = \max(R'(t)) = 2 \cdot 10^{-4}$, максимальная абсолютная ошибка $\varepsilon = 100 \cdot 10^{-6}$ с.

$\sigma \leq 1$, типичным является значение 1 с.

Если разности времени Δ между клиентом и сервером времени превышает величину σR , то коррекция времени может занять несколько периодов обновления, однако это время не может превышать величину WR , где W задается при проектировании. Обычно максимальная разность часов между клиентом и сервером, при котором реализуется алгоритм захвата равна 128-512 мс для типичного значения $W = 900$ с. Уменьшение величины W с одной стороны увеличит быстродействие системы, с другой стороны если задать малое W , то это может привести к срыву или невозможности установить захват в системе ФАПЧ.

Известно, что максимальная ошибка времени между клиентом и сервером зависит от многих параметров (детальный анализ см. [1] однако наиболее существенными являются ошибки связанные с эффектом задержки сигнала при прохождении через сеть в случае несимметричного канала данных, т.е. когда время прохождения сигнала туда и обратно существенно различны, легко видеть что верхняя оценка для величины служит параметр A оцениваемы в п.3.

Аналогичные соотношения можно получить для передаточной функции (2) ФАПЧ с ФНЧ второго порядка [1].

$$(4) K_{ref} = s^2 (s^2 + \frac{\omega_c^2}{\omega_z \tau} s + \frac{\omega_c^2}{\tau^2})^{-1}$$

где $\omega_n^2 = \frac{\alpha}{K_f}$ и $\omega_z = \frac{K_g}{K_f}$, K_g, K_f параметры выбираемые из условий $\zeta = \frac{\omega_c}{2\omega_z}$, $\zeta = 2$

Заключение

В работе рассмотрена проблема синхронизации времени в распределенной компьютерной управляющей системе функционирующей в рамках АСУ ТП объекта.

В качестве основного инструмента обеспечивающего синхронизацию времени исследуется система NTP, приведена ее общая математическая модель, обсуждаются влияние параметров модели на характеристики NTP.

Показана возможность в качестве альтернативного реализованному в NTP критерию оптимизации при выборе параметров использовать функционал квадратической ошибки.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06044, гл. 3.

Литература

1. Mills, D.L. Internet time synchronization: the Network Time Protocol. *IEEE Trans. Communications COM-39, 10* (October 1991), 1482-1493.
2. RFC 1305 D. Mills, "Network Time Protocol (v3)", 04/09/1992.

3. "Network Time Protocol Version 4 Protocol And Algorithms Specification draft-ietf-ntp-ntp4-proto-13 " <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-ntp-ntp4-proto-13> J. Burbank, D. Mills, U. Delaware, October 9, 2009
4. Радио технические цепи и сигналы. под редакцией К.А. Самойло. Москва «Радио и связь» 1982 г.
5. Основы теории автоматических систем. Я.З. Цыпкин Москва «Наука» 1977 г.
6. *Chen Peng, Dong Yue, Engang Tian and Zhou Gu* . A delay distribution based stability analysis and synthesis approach for networked control systems Journal of the Franklin Institute, Volume 346, Issue 4, Pages 349-365 May 2009.
7. *Cruz R. L.* A Calculus for Network Delay. Part I: Network Elements in Isolation. IEEE Transactions on Information Theory, Volume Jan. 1991 37: 114-131.
8. *Cruz R.L.*, A calculus for network delay. II. Network analysis Information Theory, IEEE Transactions on information theory. Jan 1991 Volume: 37: pp. 132-141.
9. *Turner J.* "New Directions in Communications (or which way to the information age?", IEEE Communications, v24 number 10, Oct 86, p.8-16.
10. *Sidi, M.; Liu, W.-Z.; Cidon, I.; Gopal I.* Congestion control through input rate regulation. Communications, IEEE Transactions on Volume 41, Issue 3, Mar 1993 pp. 471 – 477.
11. *Le Boudec J.-Y., Thiran C, P..* Network Calculus A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Online Version of the Book Springer Verlag - LNCS 2050. Version May 10, 2004.
12. *Масолкин С.И. Промыслов В.Г.* Расчет некоторых параметров промышленной вычислительной сети объектов повышенного риска эксплуатации на примере АСУ ТП АЭС. Проблемы управления №1 2010 с. 47-52.