

УДК 004.021

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА СРАБАТЫВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПО ТОКУ ПЕРЕГРУЗКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО СЧЕТЧИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Воробьев А.Е., Лихтциндер Б.Я.*

В статье рассматривается алгоритм определения предаварийного состояния и пример его использования на объектах электроэнергетики.

**Ключевые слова:** система мониторинга, определения предаварийного состояния, объекты электроэнергетики, счетчик электроэнергии, автоматический выключатель, алгоритм «текущее ведро».

### Введение

В [1] авторами был рассмотрен алгоритм анализа потребления электроэнергии по времени между импульсами, основанный на алгоритме шейпера трафика «Leaky bucket» (текущее ведро). Реализация алгоритма, при использовании счетчиков электрической энергии, имеющих импульсный выход, возможна на базе программного или аппаратно реализуемого реверсивного счетчика импульсов. На суммирующий вход указанного счетчика поступают импульсы от счетчика электроэнергии, а на вычитающий вход поступают импульсы от генератора с интенсивностью равной  $1/\tau$ . Показания счетчика импульсов ограничены в сторону уменьшения нулевым значением. Если число импульсов, поступивших на вычитающий вход, окажется больше числа импульсов, поступающих на суммирующий вход, то показания счетчика остаются равными нулю.

Показания счетчика в каждый момент времени определяют перерасход энергии по отношению к предельному. Если в какой-либо момент времени показания счетчика импульсов превысят допустимое значение, в системе мониторинга выдается сигнал о предаварийном состоянии объекта мониторинга, и соответствующая информация передается в диспетчерский центр [1].

Для каждого конкретного случая применения данного алгоритма рассчитываются значения периода  $\tau$  следования импульсов от генератора и верхний порог перерасхода энергии  $A_{кр}$ . В данной статье рассматривается метод расчета указанных выше параметров и применение данного алгоритма на практике.

Рассмотрим схему организации подключения счетчика электроэнергии, представленную на рис. 1, где изображен счетчик активной энергии РИ и автоматический выключатель SF1, через который запитана нагрузка. При такой схеме счетчик предоставляет информацию о текущем потреблении электроэнергии нагрузкой, следовательно, система, реализующая данный алгоритм, может использовать ее для прогнозирования времени срабатывания автоматического выключателя SF1.

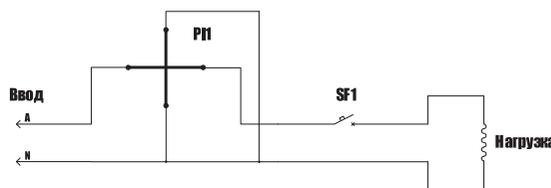


Рис. 1. Принципиальная схема электропитания

Задача состоит в том, чтобы реализовать систему управления, основанную на данном алгоритме. Система выдает сигнал, о том, что в ближайшее время автоматический выключатель разорвет цепь питания. Этот сигнал может быть использован для информирования диспетчера о скором отключении потребителя из-за перегрузки либо с целью отключения части второстепенных потребителей для уменьшения нагрузки.

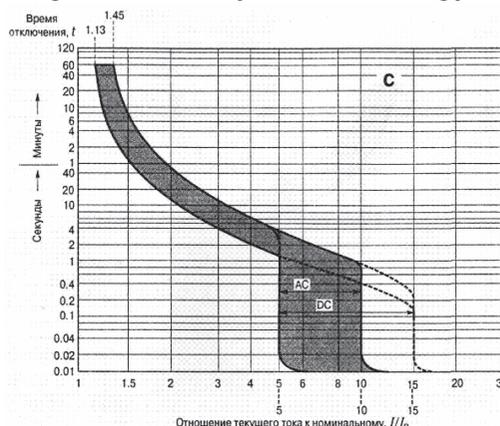


Рис. 2. Характеристика типа С автоматического выключателя

Автоматический выключатель – это механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальных условиях цепи, включать и проводить токи в течение определенного промежутка времени и прерывать их при определенных аномальных условиях цепи, например, при коротких замыканиях [2]. Автоматический выключатель имеет характеристику, указанную на рис. 2 [3]. Для примера взята характеристика типа С. Наибольший интерес представляет собой участок с перегрузками от 1,45 до 5, так как при перегрузках меньших 1,45 автомат не сработает, а при перегрузках больше 5 – сработает почти мгновенно (менее 1 с), что не позволит принять какие-либо предупредительные меры.

Вне зависимости от того, какого типа автоматический выключатель, при постоянной перегрузке 1,45 он должен отключить подачу тока через 1 ч. Тип характеристики (А, В, С или D) влияет лишь на то, при какой перегрузке автоматический выключатель отключит ток мгновенно (с крайне малой задержкой).

Таким образом, параметры автоматического выключателя будут определять поведение объекта исследования при перегрузках. Следовательно, такие параметры алгоритма, как  $\tau$  и  $A_{кр}$ , должны рассчитываться на основе характеристики автоматического выключателя.

Используются следующие обозначения:  $N$  – потребляемая нагрузкой мощность;  $\nu = 1/\tau$  – интенсивность следования импульсов;  $\tau$  – период следования импульсов;  $a'$  – коэффициент пересчета, постоянная счетчика [1/кВт·ч];  $a$  – коэффициент пересчета, постоянная счетчика [1/Вт·с];  $T$  – время анализа;  $A_{кр}$  – «объем ведра», критический уровень перерасходованной энергии;  $I$  – сила тока;  $U$  – напряжение питающей электросети.

В документации на счетчики электроэнергии с импульсным выходом дается коэффициент пересчета (постоянная счетчика), выраженный в единицах [1/кВт·ч]. Для преобразования в международную систему единиц используется формула  $a = \frac{a'}{3600 \cdot 1000}$ .

### Метод расчета

Рассмотрим аналоговую модель данного алгоритма. В ведро втекает вода с меняющимся случайным образом расходом  $\nu$  (поступление импульсов от счетчика электроэнергии на суммирующий вход), а вытекает с постоянным расходом  $\nu_{кр}$  (поступление импульсов от программно-

го генератора на вычитающий вход). В случае если уровень воды в ведре равен нулю, то и расход  $\nu_{кр}$  тоже равен нулю. Сигнализация сработает, когда в ведро наберется вода объемом  $A_{кр}$ . Это произойдет за время  $T$  с момента начала отсчета.

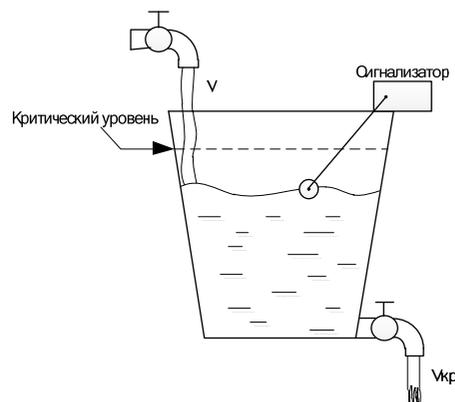


Рис. 3. Модель «текущее ведро»

В общем виде модель описывается следующим уравнением.

$$A_{кр} = \int_{t_1}^{t_2} \nu(t) dt - \nu_{кр} (t_2 - t_1),$$

где  $t_1, t_2$  – рассматриваемый временной интервал, при этом  $t_2 - t_1 = T$ .

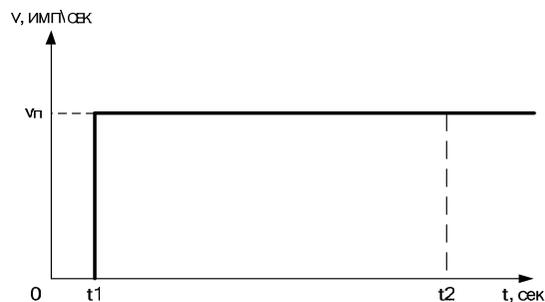


Рис. 4. Ступенчатая нагрузка

Для простоты расчета принимаем, что нагрузка нарастает ступенчато и не меняется со временем (рис. 4), то есть  $\nu(t) = \nu_n$ . Тогда формула преобразуется к виду

$$A_{кр} = \nu_n (t_2 - t_1) - \nu_{кр} (t_2 - t_1) = (\nu_n - \nu_{кр}) T.$$

В данном случае имеются два неизвестных:  $A_{кр}$  и  $\nu_{кр}$ , поэтому для их определения необходимо составить систему уравнений

$$\begin{cases} (\nu_{n1} - \nu_{кр}) T_1 = A_{кр}; \\ (\nu_{n2} - \nu_{кр}) T_2 = A_{кр}. \end{cases} \quad (1)$$

Они устанавливают зависимости критического уровня расходуемой энергии  $A_{кр}$  от токов нагрузки  $I_1$  и  $I_2$  (которым соответствуют интенсивности следования импульсов от счетчика  $\nu_{n1}$  и  $\nu_{n2}$ ) и интервалов времени  $T_1$  и  $T_2$ , за которые происходит превышение указанного уровня, соответственно.

Примем, что система должна выдать предупреждение о предстоящем отключении при токе нагрузки 145% от номинала (перегрузка 1,45) за 20 мин., а при 200% – за 8 сек. То есть берутся две точки ниже графика характеристики автоматического выключателя, с тем чтобы создать запас по времени для принятия предупредительных мер. В данном случае – при перегрузке 1,45 запас составит 40 мин., а при двукратной перегрузке – порядка одной минуты.

Выразим частоту следования импульсов через потребляемый ток при мощности  $N$ :

$$\nu = Na = I U a, \quad (2)$$

где  $U$  – среднее значение напряжения сети;  $I$  – сила тока. Используя (2), преобразуем систему (1) и получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} I_{кр} = \frac{I_2 T_2 - I_1 T_1}{T_2 - T_1}; \\ A_{кр} = (I_2 - I_{кр}) U a T_2. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим для примера автоматический выключатель с характеристикой типа С и номинальным током 10 А. Примем, что напряжение электрической сети постоянно и равно  $U = 220$  В, а стандартный коэффициент пересчета счетчика  $a' = 3200$  имп/кВт·ч. Тогда, подставив эти значения в систему уравнений (3), получим следующие результаты:

$$\begin{aligned} I_{кр} &= 14,46 \text{ А}; \\ \nu_{кр} &= 2,828 \text{ имп / сек}; \\ A_{кр} &= 8,66 \text{ имп}. \end{aligned}$$

Указанные постоянные могут быть заложены в программу контроллера, реализующую данный алгоритм.

### Быстрый способ расчета

Смысл расхода  $\nu_{кр}$  в том, что он не позволяет ведрu наполняться при перегрузках до 1,45. Если принять значение  $\nu_{кр}$ , соответствующим перегрузке 1,45; то есть  $I_{кр}/I_n = 1,45$ ; то ведро не будет наполняться и не приведет к срабатыва-

нию сигнализатора при перегрузках до 1,45; что и требуется от системы.

В этом случае весь расчет сводится к вычислению одной неизвестной  $A_{кр}$  из линейного уравнения

$$A_{кр} = (I_n - I_{кр}) U a T_n.$$

С учетом  $I_{кр}/I_n = 1,45$  получим

$$A_{кр} = \left( \frac{I_n}{I_n} - 1,45 \right) I_n U a T_n, \quad (4)$$

где значения  $A_{кр}$  и  $T_n$  по-прежнему выбираются на основании графика характеристики автоматического выключателя.

### Реализация алгоритма

Пример программы для микроконтроллера, написанной на языке С:

```
float k;
float t;
const float h = 8.66;
const float n = 2.828;
void pulse_int_handler(void) {
    k = k - n * t;
    t = 0;
    if (k > h)
        do_smth();
    if (k < 0)
        k = 0;
    k++;
}
```

Переменные:

- k (тип float (число с плавающей запятой)) – обозначает «уровень в ведре», имп.;
- t (тип float) – время, прошедшее с момента прихода предыдущего импульса, сек.

Константы:

- h (тип float) – критический уровень  $A_{кр}$ , имп.;
- n (тип float) – критический расход  $\nu_{кр}$ , имп/сек.

Здесь функция «pulse\_int\_handler» является обработчиком прерывания, вызываемым каждый раз, как на цифровой вход микроконтроллера приходит импульс со счетчика электроэнергии. Переменная t увеличивается на 1/F в аппаратном счетчике микроконтроллера (генератор импульсов, подаваемых на вычитающий вход), работающем на частоте F [Гц]. Чем больше частота F, тем меньше погрешность расчета текущего уровня ведра.

Главным достоинством алгоритма является простота расчета и высокая скорость выполнения на микропроцессорном устройстве. Часто для подобных задач используется микроконтроллеры, процессоры которых не поддерживают операции работы с числами с плавающей точкой. Если использовать вышеприведенный код, то компилятор добавит библиотеки эмуляции работы с числами с плавающей точкой, что приведет к снижению производительности программы. В этом случае для ускорения работы рекомендуется избавиться от чисел с плавающей точкой путем умножения всех значений, для примера, на 1000:

```
int k;
int t;
const int h= 8660;
const int n= 2828;
void pulse_int_handler(void) {
    k = k - n * t/ 1000;
    t = 0;
    if (k > h)
        do_smth();
    if (k < 0)
        k = 0;
    k = k + 1000;
}
```

Переменные:

- k (тип int (целое число)) – обозначает «уровень в ведре», имп/1000;
- t (тип int) – время, прошедшее с момента прихода предыдущего импульса, миллисек.

Константы:

- h (тип int) – критический уровень  $A_{кр}$ , имп/1000;
- n (тип int) – критический расход  $\nu_{кр}$ , имп/(1000\*сек).

Использование значений переменных и констант, умноженных на 1000, а также применение операций целочисленного деления с остатком в итоге даст погрешность, меньшую по сравнению с погрешностью работы алгоритма в режиме с плавающей точкой.

### Ограничения алгоритма

Запас времени до срабатывания автоматического выключателя существенно зависит от постоянной  $a$  счетчика электроэнергии. Так как расчеты по алгоритму выполняются только по приходу каждого очередного импульса от счетчика, то скорость выполнения расчетов зависит от типа счетчика. При прочих равных условиях счетчик, у которого постоянная больше, будет выдавать импульсы чаще.

Время срабатывания системы при постоянной перегрузке находится из формулы (4):

$$T_{сраб} = \frac{A_{кр}}{(I - I_{кр})Ua}. \quad (5)$$

Если считать, что время между импульсами счетчика электроэнергии пренебрежимо мало, то запас времени до срабатывания системы, работающей по данному алгоритму, при постоянной перегрузке будет равен  $T_{зан} = T_{сраб}^{авт} - T_{сраб}$ , где  $T_{сраб}^{авт}$  – время срабатывания автоматического выключателя,  $T_{сраб}$  – время срабатывания системы.

В реальности время запаса до срабатывания автоматического выключателя будет меньше расчетного, так как из него необходимо вычесть время  $T_{зад}$  до прихода последнего импульса, когда, собственно, и произведется расчет программы по алгоритму:

$$T_{зан}^{реал} = T_{зан} - T_{зад} = T_{сраб}^{авт} - T_{сраб} - T_{зад},$$

где  $T_{зад}$  – время задержки до начала расчета по алгоритму.

В худшем случае время задержки будет равно времени между двумя импульсами при данной перегрузке:  $T_{зад} = \frac{1}{\nu}$ , или  $T_{зад} = \frac{1}{IUa}$ . Данную

особенность необходимо учесть перед началом расчета параметров ( $I_{кр}$ ,  $A_{кр}$ ), чтобы выбрать запас времени до срабатывания автоматического выключателя больше на  $T_{зад}$ , либо выбрать другой счетчик электроэнергии, с большей постоянной  $a$ .

Чем больше значение постоянной счетчика  $a$ , тем быстрее работает алгоритм.

Рассмотрим следующий пример. При постоянной счетчика  $a' = 3200$  имп/кВт·ч и токе 20А (перегрузка 200%) время между импульсами составит примерно  $T_{зад} = 258$  мс, что незначительно уменьшит время срабатывания. Но если постоянную счетчика принять равной  $a' = 100$  имп/кВт·ч, то время между импульсами составит  $T_{зад} = 8,2$  с, и система окажется неработоспособной, так как она должна выдать сигнал с запасом  $T_{зан} = 8$  с. В реальности же срабатывание системы произойдет на 0,2 с позже срабатывания автоматического выключателя.

Для наглядности на рис. 5 приведены следующие графики: I – период следования импульсов от счетчика с постоянной  $a' = 200$  имп/кВт·ч, II – период следования импульсов от счетчика с постоянной  $a' = 3200$  имп/кВт·ч, III – график зависимости времени срабатывания системы, работающей по данному алгоритму, от нагрузки. Как

видно, при определенных значениях нагрузки график I идет выше графика III, что делает невозможным работу системы. Однако, из графика II видно, что период между импульсами будет пренебрежимо мал, и это будет влиять на время запаса до срабатывания автоматического выключателя незначительно.

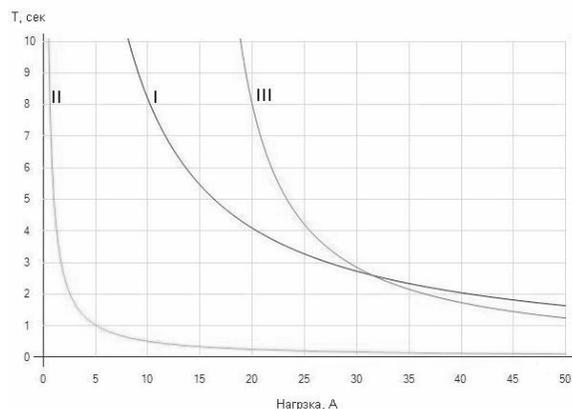


Рис. 5. Временные характеристики системы и счетчика импульсов

### Методика расчета параметров

1. Для конкретной нагрузки подбирается автоматический выключатель с определенной характеристикой и номинальным током  $I_n$ .

2. Выбирается время запаса и счетчик электроэнергии с некоторой постоянной  $a$ , и на основании этих значений, проверяется реальное время запаса:

$$T_{зап}^{реал} = T_{зап} - T_{зад} = T_{зап} - \frac{1}{I_{макс} U a},$$

где  $I_{макс}$  — максимальное значение тока перегрузки, при которой еще возможен запас по времени срабатывания системы. Это значение зависит от типа характеристики автоматического выключателя.

Реальное время запаса должно быть достаточным для выполнения каких-либо необходимых действий. В противном случае выбирается счетчик импульсов с большей постоянной либо задается большее  $T_{зап}$ .

3. Производится расчет параметров алгоритма по формулам (3) или (4). При этом на графике характеристики автоматического выключателя берутся точки со временем срабатывания равным:

$$T_{сраб,i} = T_{сраб,i}^{авт} - T_{зап,i}$$

Следует отметить, что время запаса здесь берется без учета  $T_{зад}$ .

На рис. 6 показаны характеристики реального автоматического выключателя (I) и системы, работающей по данному алгоритму (II).

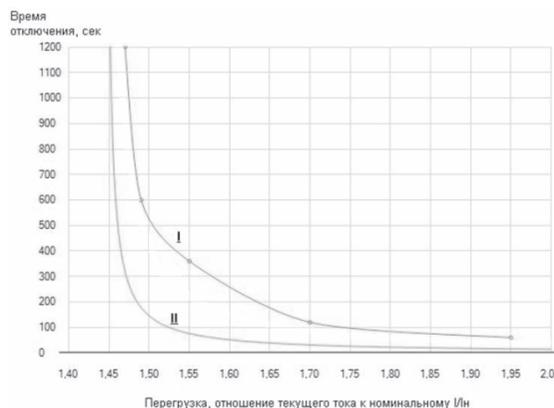


Рис. 6. Характеристики автоматического выключателя (I) и системы (II)

### Заключение

Хотя данный алгоритм является простым и быстрым в расчете и реализации на микропроцессорном устройстве, у него есть ряд особенностей. В модели «текущее ведро» зависимость времени срабатывания от перегрузки обратно пропорциональная (согласно формуле (5)), в то время как в реальном автоматическом выключателе эта зависимость имеет иной, более сложный характер.

Недостаток алгоритма заключается в том, что в расчетах по формуле (3) использовалось фиксированное значение напряжения питания равное 220В. В реальных условиях напряжение редко точно соответствует этому значению. Поэтому любые отклонения будут приводить к погрешностям в расчетах. Таким образом, алгоритм необходимо использовать с учетом вышеуказанных особенностей.

### Литература

1. Воробьев А.Е., Лихтциндер Б.Я. Применение моделей массового обслуживания в системах мониторинга электроэнергетических параметров // ИКТ. Т.10, №3, 2012. – С. 44-46.
2. ГОСТ Р 50030.2-99. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели.
3. Харченко В.Н., Харченко В.Ю. Автоматические выключатели модульного исполнения: справочное пособие. М.: ООО «Сименс», 2002. – 112 с.

## AUTOMATIC CIRCUIT BREAKER OVERLOAD CUTTING OUT MOMENT PREDICTING ALGORITHM, WITH USING OF PULSED ELECTRICITY SUPPLY METER

Vorobyov A.E., Lichtzinder B.Y.

The article describes electric power facilities pre-emergency state detecting algorithm, and the example of application of such algorithm is given.

**Keywords:** the monitoring system, detecting of pre-emergency state, electric power facilities, electricity supply meter, the «leaky bucket» algorithm.

Воробьев Анатолий Евгеньевич, аспирант Кафедры мультисервисных сетей и информационной безопасности (МСИБ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). (8-342) 256-60-05 доб. 7-25; 8-950-44-99-567.

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор Кафедры МСИБ ПГУТИ. Тел. (8-846) 333-47-69. E-mail: lixt@samtel.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И ИНФОРМАТИКИ



**Самарский Региональный  
Телекоммуникационный  
Трейнинг Центр**



### ПЕРЕЧЕНЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ КУРСОВ

- Повышение квалификации руководителей и специалистов телекоммуникационных предприятий;
- Строительство и эксплуатация ВОЛП;
- Монтаж и измерение электрических кабелей связи;
- Структурированные кабельные системы;
- Сети и системы телекоммуникаций;
- Электропитающие устройства телекоммуникационных систем;
- Цифровые сети и коммутация;
- Цифровое телевидение;
- Электромагнитная экология;
- Мобильная связь;
- Системы радиорелейной и спутниковой связи;
- Локальные и глобальные компьютерные сети;
- Менеджмент и маркетинг в телекоммуникациях;
- Бухгалтерский учет и финансы;
- Охрана труда;
- Защита информации;
- Авторизованный учебный центр ALT LINUX
- Microsoft IT Academy;
- Локальная академия CISCO при ПГУТИ;

Программы учебных курсов разработаны преподавателями Трейнинг Центра в соответствии с методиками, принятыми в странах Западной Европы и адаптированными к условиям России. Оптимальное сочетание теоретических и практических занятий на современном оборудовании дает возможность в короткие сроки получить необходимые знания и навыки для работы в реальных условиях.

**Наш адрес:** 443090, Самара, Московское шоссе, 77 (11-й этаж) СРТТЦ ПГУТИ.

Тел/факс: (8-846) 926-29-93, 228-00-77, 228-00-56. E-mail: [adm@srttc.ru](mailto:adm@srttc.ru) Наш сайт: [www.srttc.ru](http://www.srttc.ru)