

# Планирование приложений смешанной критичности во встраиваемых системах

Е. В. Душутина

Санкт-Петербургский политехнический университет  
elenvkov@gmail.com

**Аннотация.** В работе исследуются вопросы планирования задач реального времени с различной степенью критичности в управляющих технических системах. Рассматривается применение теории смешанной критичности при планировании программных приложений в составе встраиваемой системы, предназначенной для выявления предаварийного состояния электрооборудования, прогнозирования, обнаружения и локализации неисправностей с целью своевременной реконфигурации для восстановления исходной работоспособности оборудования. Анализируется возможность применения различных методов планирования для комплексного решения функциональных задач. В работе выборочно представлены результаты испытаний разработанной системы, а именно: результаты контроля состояния электрооборудования на примере теплового анализа и анализа токораспределения, а также результаты, отражающие работу системного планировщика реального времени, выполненного в соответствии с предлагаемым подходом.

**Ключевые слова:** планирование в системах реального времени; система, связанная с безопасностью; смешанная критичность; системное программное обеспечение

## I. ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТНУЮ ОБЛАСТЬ

Мониторинг и диагностика электрооборудования очень важны для безопасности и качества эксплуатации оборудования. Для оценки состояния оборудования необходимо проводить определенные периодические испытания, измерения и анализ собранных диагностических данных. Для этого целесообразно использовать специальные интеллектуальные встраиваемые системы управления с программным обеспечением реального времени для осмотра электрооборудования. Такие системы контроля относятся к классу систем, связанных с безопасностью, а системы управления самим электрическим и силовым оборудованием являются системами, критически важными для безопасности.

В соответствии со стандартом IEC 61508 (IEC 61511/IEC 61513), система обеспечения безопасности включает в себя все необходимое (аппаратное обеспечение, программное обеспечение и человеческий фактор) для выполнения одной или нескольких функций безопасности, сбой в которых может привести к значительному увеличению риска безопасности для людей и окружающей среды [1]. Мониторинг состояния электрооборудования включает в себя специальные технологии: анализ вибрации, термографию, анализ распределения тока и анализ сигнатур тока, технологию компьютерного зрения и обработки изображений для реализации автоматического обнаружения разрушения, а

также сохранение сегментов видео в видео наблюдения для дальнейшего анализа.

Примеры применения сигнатурного анализа в интеллектуальных диагностических системах и устройствах описаны в [2] и [3]. В статье [2] предлагается новый метод измерения на основе автономного анализа электрических сигнатур (AESAs), реализованный в интеллектуальных электронных устройствах (IED) IED, обеспечивающих круглосуточный онлайн-мониторинг. Обосновано предпочтение сигнатурного анализа вибрационному. Анализ электрических характеристик (ESA) представляет собой неинвазивный метод, который все чаще применяется для профилактического обслуживания вращающихся электрических машин [4].

Деградация электрооборудования может вызвать чрезмерный перегрев, выход оборудования из строя, а также привести к катастрофическим последствиям – травмам или даже смерти. Распознавание инфракрасных изображений используется для предварительной обработки изображений в интеллектуальной системе мониторинга электрооборудования с компьютерным зрением, описанной в [5]. Также в [6] рассматривается контроль теплового состояния электрооборудования с помощью инфракрасной термографии с использованием нейронных сетей. Отдельные эффективные методы контроля состояния по вибросигналу и влиянию неисправностей на вибросигнал рассмотрены в [7].

Большое количество работ посвящено разработке систем мониторинга электрооборудования с использованием веб-технологий и облачных технологий, а также IaaS [8][9][5].

## A. Основные определения и направления исследований

В различных отраслях во встроенных системах наблюдается растущая тенденция к тому, что несколько функций с разными уровнями «критичности» (или важности) интегрируются на единой вычислительной платформе. Проблема таких систем заключается в необходимости управлять ресурсами, резко отличающимися характером требований к ним. Возникает вопрос, как сбалансировать их конфликтующее совместное использование. Для решения этой проблемы целесообразно применять концепцию смешанной критичности. Критичность определяется как уровень гарантии от серьезного отказа, необходимый для системного компонента [10]. Обычно отказ высоко критической функциональности приводит к более серьезным последствиям для всей системы, чем отказ низко критической [11]. Для системы задач реального времени с двумя уровнями критичности, в нескольких исследованиях предложены алгоритмы

планирования и соответствующие им тесты на планируемость [12]. Некоторые из этих результатов распространяются более чем на два уровня критичности [13]. Ряд работ посвящены решению сопутствующих смешанной критичности проблем, например, как переключиться обратно в режим с низким уровнем критичности, как поддерживать выполняемость задач с низким уровнем [14], как выполнять приложений со смешанной степенью критичности на многоядерных платформах [15][16] и т. д.

### В. Постановка задачи

Требуется обеспечить планирование функциональных задач и приложений для системы задач смешанной критичности с определенным набором периодических и спорадических задач в режиме реального времени, а затем применить и проверить полученное решение на системе мониторинга состояния электрооборудования. Для этого необходимо выполнить:

- анализ всего комплекса прикладных задач, их классификацию по временным характеристикам и требованиям к их выполнению;
- выбор методов планирования с учетом мощности вычислительных ресурсов (для одно- и многоядерных платформ);
- оценку выполнимости задач в заданные сроки.

Для решения этих задач потребуется построить математическую модель, а это означает, что необходимо:

- выделить объекты диспетчеризации для системы рассматриваемого типа;
- определить соответствующие условия своевременной реализации функциональных задач с учетом требований и сроков выполнения;
- выделить комбинацию процедур распределения выбранных объектов диспетчеризации по имеющимся вычислительным ресурсам в априори сформированном базисе методов.

А затем применить результаты решения задачи планирования, полученные в общем виде, к разрабатываемой системе контроля состояния электрооборудования.

Задачи для системы мониторинга состояния электрооборудования весьма разнообразны (виды прикладных задач см. в разделе 3.1), сильно отличаются друг от друга: по способам реализации, объему вычислений, вычислительной нагрузке, характеру выполняемых работ, периодичности поступления задач, срокам выполнения и т. д. Такая неоднородность существенно влияет на планирование. Поэтому требуется более формализованное представление функциональной задачи в виде объекта диспетчеризации. Каждый объект должен быть классифицирован, т. е. должен быть установлен: тип задачи – легкая/сверхлегкая, тяжелая, другая; степень периодичности и характер приема – периодический, аperiodический/спорадический; собственно периоды и номинальные продолжительности исполнения; сроки и бюджеты для каждого объекта, а также уровни критичности. Должны быть указаны возможность и условия вытесняемости для каждого объекта.

Необходимо формировать подмножества объектов по степени их связности, а именно: взаимозависимые и взаимодействующие при выполнении, а также с фиксированным порядком выполнения друг относительно друга. Ранжирование задач по связности и вытесняемости позволяет учесть необходимые блокировки, переключения контекстов и интерференцию задач. Классификация объектов диспетчеризации по степени связности существенно влияет на возможности миграции объектов в отношении вычислительных ресурсов и интерференцию объектов.

В итоге мы намерены достичь следующие цели:

- предложить подход к планированию задач реального времени для системы смешанной критичности;
- применить подход к системе контроля состояния электрооборудования, связанной с безопасностью; для этого разработать системное и прикладное программное обеспечение (ПО) для встроеной системы мониторинга с предлагаемым подходом к диспетчеризации.

## II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В системах жесткого реального времени предпочтительнее использовать статические методы планирования, поскольку методы динамического планирования или процедуры динамической приоритизации не гарантируют полной предсказуемости системы [10][17]. Напомним, что от систем, критичных к безопасности, требуется работа с минимальными рисками отказов и сбоев. В системах, связанных с безопасностью, ограничения несколько ниже, но не существенны. Поэтому предпочтительнее использовать статические в той части системы смешанной критичности, где решаются задачи жесткого реального времени [18]. Однако даже при статическом планировании некоторые риски связаны с хорошо известным эффектом Дхолла [19]. Тенденция к динамическим подходам в системах общего назначения закономерна, прежде всего, из-за низкой вычислительной эффективности статических систем. Однако динамические системы требуют больше ресурсов для самообслуживания. Для сравнения, сложность однопроцессорной реализации EDF-планирования составляет  $O(\log N)$ , а для статического планирования (RMS) –  $O(1)$ . Условие выполнимости согласно частотно-монотонному анализу RMA (UB-Test)

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq n \left( 2^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad (1)$$

обозначим,  $U = \sum_{i=1}^n C_i/T_i$  – суммарная вычислительная нагрузка на исполнительный ресурс для выполнения системы задач типа  $\tau_i$ ;  $u_j$  – нагрузка на исполнительный ресурс от задачи  $\tau_j$ ;  $C_i$  – лимит времени выполнения задачи (WCET) в периоде  $T_i$  (наихудший случай по времени исполнения).

Другой подход – оценка времени отклика. Для анализа работоспособности системы реального времени  $R_i^{(k)}$  используется расчет времени отклика (Response Time):

$$R_i^{(k)} = C_i + \sum_{j=1}^{i-1} \left( \frac{R_i^{(k-1)}}{T_j} \right) \cdot C_j; R_i^{(0)} = C_i \quad (2)$$

Согласно RTA, система задач возможна с использованием RMS, если

$$\forall \tau_i: R_i \leq D_i$$

где  $D_i$  – предельный срок выполнения – крайний срок.

Практическое использование (2) сложнее, чем (1), особенно для большого количества задач, поэтому иногда предпочтительнее гиперболический граничный тест.

Для синхронизированных задач планирование достижимо, если выполняется следующее условие:

$$C_1/T_1 + \dots + C_n/T_n + \max(B_1/T_1, \dots, B_{n-1}/T_{n-1}) \leq n \left( 2^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad (3)$$

где  $B_i$  продолжительность блокировки в критическом сценарии. Точно так же вы можете учитывать переключения контекста; для этого параметр  $C_i$  в (3) определяется временем переключения исполнительного ресурса  $C_s$ :

$$C_i' = C_i + 2C_s$$

Уточним  $C_i$  временем выполнения перепланирования  $D_e$ , и интервалом времени блокировки задач, необходимым для планирования низкоприоритетных задач  $D_b$ : (4)

$$C_i'' = C_i + 2C_s + D_e + (n - i) \cdot D_b = C_i' + D_e + (n - i) \cdot D_b \quad (4)$$

Далее анализ выполняется на основе соотношения периода и срока для экземпляра задачи при  $D_i < T_i$ . (Уточнение (4) используем в (2)).

Затем выводится условие реализуемости (выполнимости) для  $m$  исполнительных ресурсов (многоядерных/многопроцессорных) и группировки задач по критерию нагрузки: легкие, тяжелые и другие (здесь не будем приводить из-за громоздкости). Следующая оценка времени отклика  $R_i$  соответствует планированию задач с неявными крайними сроками в многопроцессорной/многоядерной системе с  $m$  ресурсами:

$$R_i = C_i + \frac{1}{m} \sum_{j < i} \left( C_j \left\lceil \frac{R_i}{T_j} \right\rceil + C_j \right) \quad (5)$$

В реальных системах требуется учитывать интерференцию задач. В этом случае время отклика рассчитывается как сумма времени вычислений, требуемого задачей, и суммы относительных помех от высокоприоритетных задач: (6)

$$R_i = C_i + \frac{1}{m} \sum_{j < i} \min(I_j^{Cl}(R_i)) \quad (6)$$

$I_j^{Cl}(R_i)$  – верхняя граница относительной интерференции задачи  $\tau_j$  в течение интервала времени отклика, если выполняется высокоприоритетная задача  $\tau_j$ . При отсутствии таких предшествующих

высокоприоритетных задач интерференция обозначается как

$$I_j^{NC}(R_i) = \min(W_j^{NC}(R_i), R_i - C_i + 1),$$

где  $W_j^{NC}(R_i)$  – объем вычислений, необходимых для выполнения задачи  $\tau_j$  на интервале  $R_i$  при определенных условиях.

Разница интерференций

$$I_j^{DIFF}(R_i) = I_j^{Cl}(R_i) - I_j^{NC}(R_i)$$

характеризует максимальный вклад в помехи своевременного выполнения задачи, обусловленные влиянием выполнения предыдущих задач. Таким образом, (с учетом (6)) методика оценки времени отклика задач, выполняемых с использованием многопроцессорного планирования со статическим приоритетом: (7)

$$R_i = C_i + \left\lfloor \frac{1}{m} \left( \sum_{j \in hp(i)} I_j^{NC}(R_i) + \sum_{j \in \text{Max}(i, m-1)} I_j^{DIFF}(R_i) \right) \right\rfloor$$

$hp(i)$  – набор задач, приоритет которых выше, чем  $\tau_i$ ,  $\text{Max}(i, m-1) \subset hp(i)$  – подмножество из  $m-1$  задач с максимальным значением интерференции.

Модель задач, широко используемая в большинстве предыдущих исследований по планированию систем со смешанной степенью критичности (например, [20][21][22]), представляет собой прямое расширение классической модели спорадических задач [23] для условий со смешанной степенью важности; время выполнения одной задачи в наихудшем случае может варьироваться в зависимости от уровня критичности. В большинстве этих работ модель задачи ограничена двумя уровнями, т.е. задача может быть как низко критической, так и высоко критической. В данной работе мы дополнительно выделяем отдельный уровень со статическим планированием для задач с наивысшей критичностью.

Таким образом, рассматривая одновременно подходы смешанной критичности и разделяемого планирования [24] для нескольких ресурсов и различных уровней критичности, мы будем применять методы статического планирования для набора задач жесткого реального времени верхнего уровня критичности и динамического планирования (EDF) для периодических и спорадических задач ниже лежащих уровней.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Для реализации выше описанных подхода и методов было разработано системное и прикладное ПО для анализа состояния электрооборудования, результаты функционирования которого выборочно представлены в этом разделе.

Система мониторинга состояния электрооборудования предполагает наличие широкого спектра датчиков, устанавливаемых непосредственно на контролируемых устройствах, вблизи них, на держателях, выводах, в различных точках рабочего помещения, в системе вентиляции. Управление осуществляется встроенной интеллектуальной системой, осуществляющей онлайн-мониторинг. Некоторые данные доступны онлайн на защищенном веб-сайте и

могут быть отправлены на мобильные устройства. Выполняются параметрические корректировки для расчета средних и предельных диапазонов. Предусмотрена местная и дистанционная сигнализация, когда значение параметра выходит за пределы допустимого диапазона. Передача данных из встроенной подсистемы на более высокий уровень всей системы осуществляется для архивации, документирования и хранения данных. Таким образом, осуществляется полный цикл обработки данных с выполнением функциональных задач разного типа.

#### A. Типы функциональных задач

Мониторинг и анализ вибрации обеспечивают:

- контроль общего вибрационного состояния элементов электрооборудования; сбор данных о вибрации для обнаружения характерных изменений во вращающемся оборудовании, вызванных условиями эксплуатации оборудования или неисправностями оборудования;
- обработку данных вибрации и архивирование данных.

#### Термоконтроль

- тепловизионный контроль щеточно-контактных устройств с обеих сторон щеточно-контактного устройства; построение термограммы;
- измерение температуры всех элементов электрооборудования; определение трендов температуры холодного и горячего воздуха (на входе и выходе щеточного агрегата);
- измерение расхода воздуха (расхода) в различных точках входных окон защитных кожухов;
- измерение температуры воздуха в машинном зале возле щеточно-контактных устройств и в различных точках системы вентиляции;
- обработка и анализ результатов тепловых измерений.

#### Контроль и анализ параметров электрического тока

- измерение токов всех щеток;
- накопление осциллограмм (периодов ротора), расчет среднего тока, основанный на интегрировании осциллограммы;
- мониторинг распределения тока, статистическая обработка распределения тока с последующим анализом (отклонения: величина и стабильность);
- выборочный контроль стабильности токов отдельных щеток с помощью бесконтактных датчиков тока и специализированного аналого-цифрового преобразователя;
- контроль переменной составляющей тока ротора.

Визуальный контроль контактных поверхностей с камер дистанционно (онлайн)

- детальный визуальный контроль состояния всех щеток, щеткодержателей, выводов, контактных клемм;

- визуальный контроль состояния поверхности контактных колец с помощью цифрового стробоскопа;
- обработка и анализ визуальных данных;
- архивация данных для отправки, хранения и создания отчетов.

#### B. Анализ состояния электрооборудования

Целью мониторинга состояния оборудования является прогнозирование, предупреждение и своевременное выявление неисправностей и неисправностей всей системы и ее элементов. Это обеспечивается за счет одновременного использования разных технологий для повышения качества контроля. В нашей системе это технологии теплового анализа, анализа токораспределения, вибрации и визуального контроля. В качестве примера реализации представлены только два из них: контроль распределения тока и тепловой анализ.

#### Пример анализа токораспределения для электрооборудования.

Качественную оценку состояния оборудования (в частности, BCD) можно произвести по виду статистики распределения тока и гистограммы распределения тока, как показано в табл. 1 и на рис. 1 ниже.

ТАБЛИЦА I РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ДЛЯ BCD (ФРАГМЕНТ ИЗМЕРЕНИЙ)

	Generator	I [A]		I average [A] (BCD)		Asymmetry[%]	
		Pole [D]	Pole [C]	Pole [D]	Pole [C]	Pole [D]	Pole [C]
1	TG -1	1609	1554	47	46	24	23
2	TG -1	1584	1475	47	43	41	44
3	TG -2	1478	1445	43	42	38	27
4	TG -2	1445	1405	43	41	41	32
5	TG -3	1568	1703	46	51	38	39
6	TG -3	1487	1378	43	41	44	41
7	TG -3	1487	1371	45	40	47	33

Анализ асимметрии позволяет прогнозировать неисправности электрических компонентов.

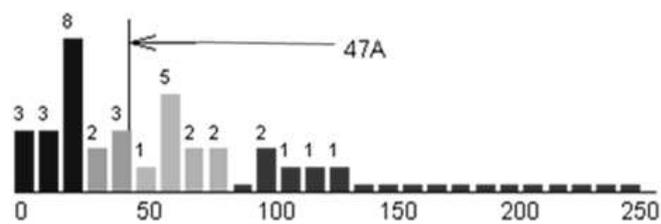


Рис. 1. Статистика токораспределения TG-1, полюс D (средний ток 47А, асимметрия 41%, № 2 в табл. 1)

## Анализ результатов теплового контроля

Рассмотрим пример аварийного события – возникновение кругового замыкания, показанного на рис. 2. Сначала наблюдается плавное повышение температуры в течение двух часов, а затем резкое ускорение роста температуры, что соответствует катастрофической фазе горения электрической дуги, примерно в 11.30 генератор был выключен, после чего температура начала снижаться.

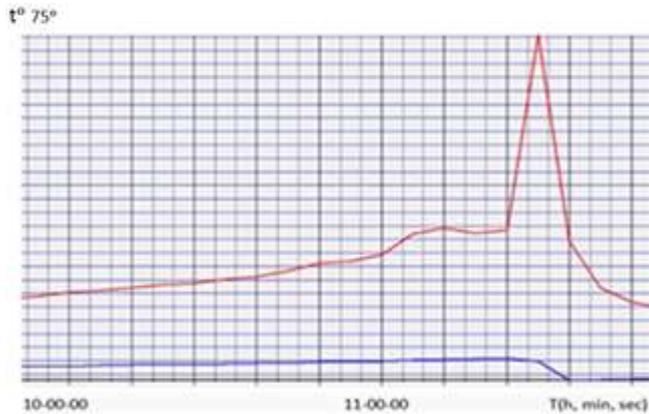


Рис. 2. Анализ результатов тепловизионного контроля BCD на примере возникновения аварийного события

## Пример анализа состояния поверхностной электропроводности.

Состояние поверхностной электропроводности контактного кольца можно оценить по осциллограммам и кривой среднего тока для элементов электрооборудования (например, BCD). Коэффициент контактного молчания – это общее время, в течение которого осциллограмма принимает предельно низкие значения, характеризующие степень разрыва контакта с поверхностью токосъемного кольца. По форме осциллограммы иногда можно увидеть частые скачки амплитуды тока, соответствующие дестабилизирующим физическим процессам, вызывающим разрыв контакта. Продолжительные слаботочные участки соответствуют обширным «грязным» пятнам на токосъемном кольце. Это позволяет прогнозировать вероятные события (круговая дуга, разрыв контакта) и предотвращать опасные события и отказы оборудования.

Таким образом, состояние поверхностной электропроводности можно определять по кривой среднего тока. На ней также будет зафиксирован отказ (например, дуговое замыкание), соответствующий быстрому перегреву. Аналогичное событие было обнаружено в результате теплового контроля, как показано ранее на рис. 2.

### С. Пример планирования функциональных приложений и системного программного обеспечения

В табл. 2 представлена выборка задач с разными типами (легкие/тяжелые) и связностью, временными параметрами: продолжительность выполнения, период прихода, время отклика, время блокировки из-за принудительного вытеснения тяжелых задач и задач с низким приоритетом. Очевидно, что время отклика каждой задачи удовлетворяет временным ограничениям

и, как правило, значительно меньше периода, несмотря на длительную принудительную и случайную блокировку задач.

На основе методов, представленных в пункте 2, строится математическая модель для исследования и оценки реализуемости тех или иных наборов задач в определенных ограничениях.

ТАБЛИЦА II ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ПЛАНИРУЕМОСТИ

	Task type	Priority	Group	C	T	$T_j^B$	$B_j$	R
1	H	63	1	117	208	105	44	160
2	H	62	2	220	397	200	87	310
3	H	61	3	898	951	476	32	921
4	H	60	4	219	398	194	89	301
5	L	42	1	17	104	-	-	78
6	L	36	-	12	220	-	-	124
7	L	35	2	15	401	-	-	173
8	L	34	4	14	403	-	-	171
9	L	15	-	45	848	-	-	729
10	L	9	-	11	917	-	-	597

Достоверность результатов моделирования зависит не только от адекватности модели, но и от адекватности формируемых на входе требований задач. Это особенно верно для критически важных и связанных с безопасностью систем. В данной работе вся совокупность задач жесткого реального времени была ранжирована по степени критичности и выделено 3 уровня. Первый – это периодические задачи с максимальной критичностью, обрабатываемые дисциплиной статического планирования без возможности миграции задач, но с поддержкой отказоустойчивости. Второй и третий уровни соответствуют остальным задачам с динамическим планированием EDF.

Для статического планирования используются методы с ранжированием задач на легкие и тяжелые типы задач (в простейшем случае) в зависимости от вычислительной нагрузки. Политика планирования учитывает затраты на изменение расписания, а также блокировки вытеснения и синхронизации. При спорадическом планировании учитывается взаимодействие задач, а при наличии многоядерного/многопроцессорного ресурса допускается миграция задач.

В результате исследования выяснилось:

- принудительное вытеснение тяжелых задач при статическом планировании настоятельно не рекомендуется;
- выделение отдельного уровня статического планирования является более затратным, хотя приемлемым для рассматриваемого типа задач, но более надежным и безопасным, что существенно для критической и связанной с безопасностью системы;
- в целом предлагаемый подход целесообразен с практической точки зрения, что подтверждается результатами анализа реализуемости задач в заданных ограничениях и результатами анализа диспетчеризации приложений для рассматриваемого класса систем.

В соответствии с предложенным подходом было разработано программное обеспечение (ПО) системы контроля состояния электрооборудования. Это развитие более раннего проекта для систем с более жесткими требованиями к временным характеристикам и отказоустойчивости [25]. Испытание системы мониторинга показало ее способность своевременно обнаруживать функциональную деградацию и неисправности в электрооборудовании. Вопросы планирования и разработки ПО реального времени, систем смешанной критичности и встроенных систем, связанных с безопасностью, могут рассматриваться в учебных целях в таких дисциплинах, как «Системное ПО» и «ПО систем реального времени» [26].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективным направлением является усовершенствование подхода смешанной критичности при разработке систем, связанных с безопасностью, а также самих систем безопасности критической важности. Дальнейшее исследование возможно в связи с попыткой оптимизировать динамическое планирование в многопроцессорных многоуровневых системах со смешанной степенью критичности. В связи с этим требуются чрезвычайно тщательного изучения проблемы перехода от разделяемого планирования (и полурасделяемого) к полностью глобальному планированию целостной системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Burns A., Davis R.I. A survey of research into mixed criticality systems. *ACM Comput. Surv.* 50, (2017).
- [2] Balakrishna P., Khan U. An Autonomous Electrical Signature Analysis-Based Method for Faults Monitoring in Industrial Motors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70, (2021).
- [3] Marecek O. Monitoring and diagnostic system of power plant electrical equipment. In: P.T. (ed.) *Proceedings of the International Conference - 2016 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika 2016.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2016).
- [4] Salomon C.P., Ferreira C., Sant'Ana W.C., Lambert-Torres G., da Silva L.E.B., Bonaldi E.L., de Lacerda de Oliveira, L.E., Torres B.S. A study of fault diagnosis based on electrical signature analysis for synchronous generators predictive maintenance in bulk electric systems. *Energies.* 12, (2019).
- [5] Liu T. Development and Application of Electrical Equipment Intelligent Detection Management System. In: *Proceedings - 2020 5th International Conference on Smart Grid and Electrical Automation, ICSGEA 2020.* pp. 70–73. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2020).
- [6] Huda A.S.N., Taib S. Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography. *Infrared Phys. Technol.* 61, 184–191 (2013).
- [7] Sadeghi I., Ehya H., Faiz J., Ostovar H. Online fault diagnosis of large electrical machines using vibration signal-A review. In: *Proceedings - 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2017.* pp. 470–475. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2017).
- [8] Elazab E., Awad T., Elgamel H., Elsouhily B. A cloud based condition monitoring system for industrial machinery with application to power plants. In: A.M., E. (ed.) *2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings.* pp. 1400–1405. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2018).
- [9] Tanasescu G., Gorgan B., Busoi S., Badita A., Notingher P. V. Monitoring and diagnosis of electrical equipment using a web software. Health index and remaining lifetime estimation. In: P., T. (ed.) *Proceedings of the International Conference - 2016 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika 2016.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2016).
- [10] Burns A., Davis R.I., Baruah S., Bate I. Robust Mixed-Criticality Systems. *IEEE Trans. Comput.* 67, 1478–1491 (2018).
- [11] Gu X., Easwaran A. Efficient schedulability test for dynamic-priority scheduling of mixed-criticality real-time systems. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* 17, (2017).
- [12] Baruah S. Mixed-Criticality Scheduling Theory: Scope, Promise, and Limitations. *IEEE Des. Test.* 35, 31–37 (2018).
- [13] Capota E.A., Stangaciu C.S., Micea M. V., Curicac D.-I. Towards mixed criticality task scheduling in cyber physical systems: Challenges and perspectives. *J. Syst. Softw.* 156, 204–216 (2019).
- [14] Chen G., Guan N., Liu D., He Q., Huang K., Stefanov T., Yi W. Utilization-Based Scheduling of Flexible Mixed-Criticality Real-Time Tasks. *IEEE Trans. Comput.* 67, 543–558 (2018).
- [15] Bhuiyan A.A., Yang K., Arefin S., Saifullah A., Guan N., Guo Z. Mixed-criticality multicore scheduling of real-time gang task systems. In: *Proceedings - Real-Time Systems Symposium.* pp. 469–480. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019).
- [16] Medina R., Borde E., Pautet L. Scheduling Multi-periodic Mixed-Criticality DAGs on Multi-core Architectures. In: *Proceedings - Real-Time Systems Symposium.* pp. 254–264. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019).
- [17] Casini D., Biondi A., Nelissen G., Buttazzo G. Partitioned Fixed-Priority Scheduling of Parallel Tasks Without Preemptions. In: *Proceedings - Real-Time Systems Symposium.* pp. 421–433. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019).
- [18] Brandenburg B.B., Gül M. Global Scheduling Not Required: Simple, Near-Optimal Multiprocessor Real-Time Scheduling with Semi-Partitioned Reservations. In: *Proceedings - Real-Time Systems Symposium.* pp. 99–110. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2016).
- [19] Dhall S.K., Liu C.L. ON A REAL-TIME SCHEDULING PROBLEM. *Oper. Res.* 26, 127–140 (1978).
- [20] Asyaban S., Kargahi M. An exact schedulability test for fixed-priority preemptive mixed-criticality real-time systems. *Real-Time Syst.* 54, 32–90 (2018).
- [21] Sabu A., Raveendran B., Ghosh, R. SMILEY. A Mixed-Criticality Real-Time Task Scheduler for Multicore Systems. In: De Grande R. Besada E., P.O.R.R.M.J.L.D.G.R. (ed.) *Proceedings of the 2018 IEEE/ACM 22nd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, DS-RT 2018,* pp. 55–62. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019).
- [22] Nagalakshmi K., Gomathi N. Criticality-cognizant clustering-based task scheduling on multicore processors in the avionics domain. *Int. J. Comput. Intell. Syst.* 11, 219–237 (2018).
- [23] Vestal, S.: Preemptive scheduling of multi-criticality systems with varying degrees of execution time assurance. In: *Proceedings - Real-Time Systems Symposium.* pp. 239–243, Tucson, AZ (2007).
- [24] Sun Y., Di Natale M. Pessimism in multicore global schedulability analysis. *J. Syst. Archit.* 97, 142–152 (2019).
- [25] Душутина Е.В. Анализ состояния электрооборудования. Сертификат РФ о государственной регистрации программ 2013611687 (2013).
- [26] Dushutina E.V. Curriculum Development Approach – the Case of Computing Education. *Lect. Notes Networks Syst.* 184, 151–170 (2021). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65857-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65857-1_15).