



(06)-0111-1

## ОСОБЛИВОСТІ УРАХУВАННЯ ХАРАКТЕРУ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ДІЙСНОЇ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЙ ПОРТАЛІВ ВІДКРИТИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ УСТАНОВОК

**Я.В. Назім, Д.В. Шанін**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2,  
86123, м. Макіївка, Україна.  
E-mail: ccit@dgasa.dn.ua*

*Отримана 02 березня 2006; прийнята 22 травня 2006*

**Анотація.** Стаття присвячена питанням урахування динамічних впливів при проектуванні конструкцій відкритих розподільних установок (ВРУ). Виконано порівняння результатів динамічних розрахунків за спрощеною та просторовою розрахунковими схемами. Проаналізовано результати розрахунків на миттєвий порив вітру, обрив проводів та вплив короткого замикання для різних варіантів конструктивних схем порталів. Розглянуто варіанти використання передових технологій бездротового зв'язку для дослідження напружено-деформованого стану елементів електромережних конструкцій, моніторингу екологічних параметрів середовища в реальному масштабі часу.

**Ключові слова:** портали ВРУ, динамічні впливи, напружено-деформований стан, токи короткого замикання, бездротовий зв'язок.

## ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ХАРАКТЕРА ВНЕШНИХ НАГРУЗОК И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ПОРТАЛОВ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**Я.В. Назим, Д.В. Шанин**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2,  
86123, г. Макеевка, Украина.  
E-mail: ccit@dgasa.dn.ua*

*Получена 2 марта 2006; принята 22 мая 2006*

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам учета динамических воздействий в расчетах конструкций порталов открытых распределительных устройств (ОРУ). Выполнено сравнение результатов динамических расчетов по упрощенной и пространственной расчетным схемам. Проанализированы результаты расчета на мгновенный порыв ветра, обрыв проводов и воздействие короткого замыкания для различных вариантов конструктивных схем порталов. Рассмотрены вопросы использования передовых технологий беспроводной связи для исследования напряженно-деформированного состояния элементов электросетевых конструкций, мониторинга экологических параметров среды в реальном масштабе времени.

**Ключевые слова:** порталы ОРУ, динамические воздействия, напряженно-деформированное состояние, токи короткого замыкания, беспроводная связь.

## THE ACCOUNT OF LOADS AND EFFECTS IN MECHANICAL CALCULATIONS OF H-FRAME STRUCTURE OF SWITCH-GEARS

Ya. Nazim, D. Shanin

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzavin str. 2,  
86123, Makeyevka, Ukraine.*

*E-mail: ccit@dgasa.dn.ua*

*Received March 02, 2006; accepted May 22, 2006*

**Abstract.** The article is dedicated to questions of the account dynamic influence when designing H-frame structure of switch-gears. Comparative analysis of results of dynamic calculations under the simplified and volumetric calculated schemes is executed. The results of the calculation of influence of dynamic component for different variant of the constructive scheme and of joins are analyzed. Comparative analysis of results of dynamic calculations of effect of a short-circuit for different variant of the constructive scheme is executed.

**Keywords:** H-frame structure, dynamic influences, tense-deformed condition, effect of a short-circuit.

### Введение

Для электросетевых конструкций существует необходимость в разработке дополнительных требований к учету динамического характера внешних нагрузок. Это обусловлено тем, что превышение расчетных ветровых нагрузок, грозовая активность вызывают сближение и склестывание проводов, возникающие зачастую при этом короткие замыкания приводят к повреждению элементов электросетевых конструкций. Кроме того, за время эксплуатации по электрическим цепям подстанций постоянно передается большая мощность, что создает интенсивную токовую загрузку проводов и опресованных соединений, и также способствует возможности возникновения КЗ.

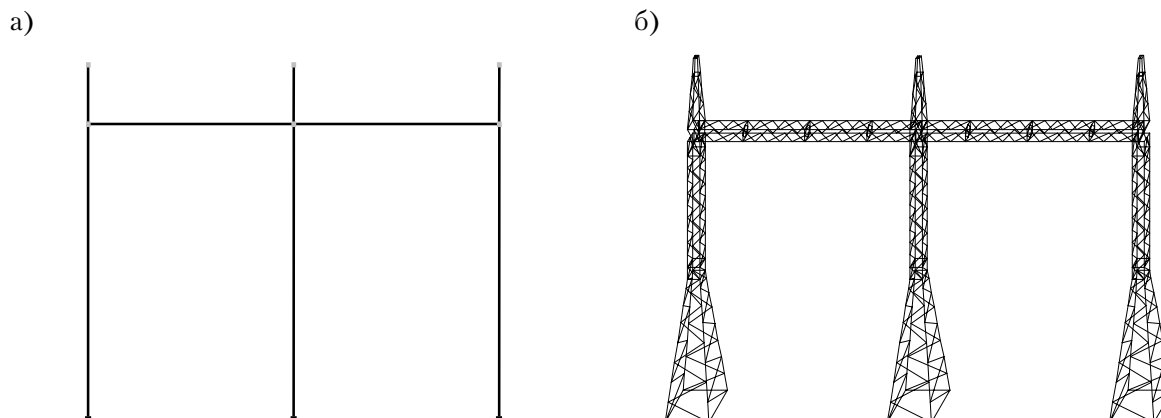
Другим аспектом проблемы является тот факт, что на данный момент нормативная база предусматривает только статический расчет в аварийном режиме при обрыве проводов [1]. Расчет на ветровые воздействия также регламентируется выполнять в статической постановке задачи. При этом динамические нагрузки, возникающие вследствие обрыва проводов либо при мгновенном порыве ветра, не учитываются. Также не учитываются динамические нагрузки, возникающие вследствие изменения тяжения проводов при коротком замыкании. Сегодня Украина идет по пути создания новых

норм проектирования, отвечающих современным требованиям надежности и безотказности строительных конструкций [2]. Тем не менее, нормативная база предусматривает только расчет сближения проводов и учет электрических параметров режима короткого замыкания. Территория Украины характеризуется повышенной грозовой деятельностью с количеством грозовых часов более 40 в год. В связи с резким нарастанием грозоактивности требуются более подробные данные о режиме распределения гроз в конкретных районах и с учетом локальных особенностей местности.

Не менее важным представляется вопрос о влиянии климатических нагрузок на НДС конструкции. В случае, если существует необходимость контроля действительной работы конструкции на значительном расстоянии от базовой точки либо в труднодоступном месте, решением вопроса может быть использование беспроводных сетей, способствующих оперативному мониторингу.

### Анализ конструктивных схем порталов ОРУ

Известно, что при определении динамической составляющей от воздействия ветра на конструкции в соответствии с требованиями СНиП [3], расчет осуществляется с использованием



**Рис. 1.** Расчетные схемы портала при расчете на динамические воздействия: а – упрощенная расчетная схема; б – пространственная расчетная схема.

приближенных динамических моделей с ограниченным числом сосредоточенных масс по высоте конструкции. Данное упрощение расчетной схемы не отражает совместную работу элементов конструкций, которую можно учитывать при расчетах по пространственной схеме с применением современных расчетных программных комплексов.

С целью сравнения результатов расчетов с применением указанных подходов выполнен динамический расчет двухпролетного линейного портала ОРУ 110 кВ.

При упрощении схемы (1-й вариант) применена методика [4], которая применяется при определении частот колебаний, которые необходимы для расчета динамической составляющей ветровой нагрузки. При этом элементы портала рассматриваются, как элементы с сосредоточенными массами. Сечение в данном случае принято таким образом, чтобы максимальные перемещения узлов соответствовали значениям перемещений при расчете конструк-

ции портала ОРУ на динамические воздействия по пространственной схеме (2-й вариант). Расчетные схемы 1 и 2-го вариантов представлены на рис. 1.

Для 2-го варианта массы элементов конструкции приложены для каждого элемента по направлению действия силы тяжести. При задании исходных данных для расчета на динамические воздействия была использована возможность ПК «SCAD-Office -7.31» для преобразования статических загрузок в сосредоточенные массы. При определении собственных колебаний к точке Z была приложена произвольная сила 10 кН. Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Результаты расчета говорят о хорошей корреляции значений частот собственных колебаний конструкции портала ОРУ при расчете по упрощенной и пространственной расчетным схемам. При этом расчет по пространственной схеме дает более достоверные результаты, поскольку учитывает совместную работу элементов конструкций.

**Таблица 1.** Колебания системы для 1-го варианта расчетной схемы портала.

Загрузка:	N	СОБСТВ.	Ч А С Т О Т Ы		ПЕРИОДЫ
			1/С	ГЦ	
жение:	П/П	ЗНАЧЕНИЯ			С
1	1	.5609313	1.56502	2.796979	2.3575285
	2	.4371858	2.83841	3.63669	2.2749753
	3	.378049	2.45158	4.212035	1.2374149
	4	.3124433	3.80322	5.064208	1.1974642
	5	.2104185	7.50926	7.56517	.8321847

Таблица 2. Колебания системы для 2-го варианта расчетной схемы портала.

Загру- жение:	N : П/П	СОБСТВ. : ЗНАЧЕНИЯ	Ч А С Т О Т Ы		ПЕРИОДЫ : С
			1/С	ГЦ	
1	1	.6292825	1.589111	2.2530431	3.951894
	2	.328827	3.041112	3.4842535	2.065033
	3	.2717811	3.67943	3.5858966	1.706785
	4	.1900152	5.262736	6.8380153	1.193295
	5	.1460078	6.848946	8.090596	.9169293

Для реализации поставленных целей при исследовании воздействий мгновенного порыва ветра и обрыва проводов необходимо изучить работу порталов ОРУ различной конструктивной формы.

Анализ существующих проектных решений ОРУ показывает, что, несмотря на многообразие факторов, определяющих конструктивную форму порталов, их схемы однотипны [5]. В настоящее время в Украине применяются порталы ОРУ выполненные в виде свободностоящих П-образных одно- и многопролетных статически-неопределимых рам (см. рис. 1, б). Сопряжение стоек и траверс, как правило, выполняется шарнирным, а стойки жестко защемляются в фундаменте. Металлические порталы ОРУ, обычно изготавливаются из элементов уголкового профиля, объединенных в пространственную конструкцию. Решетка может выполняться из стали круглого или квадратного сечения. Соединение элементов осуществляется с помощью сварки или на болтах.

Длительный опыт проектирования и эксплуатации традиционных конструкций порталов выявил целый ряд существенных недостатков:

- многодельность конструкций и высокая трудоемкость изготовления;
- чувствительность к коррозионному износу и эксплуатационным повреждениям;
- низкая надежность.

Эти недостатки вызваны, в первую очередь, тем, что конструкции состоят из большого числа мелких элементов (стержни с высокой гибкостью и тонкой стенкой профиля).

Перспективными конструкциями являются трубчатые порталы. В настоящее время и в Украине и в России ведутся исследования с целью создания трехгранных электросетевых конст-

рукций. Такое решение весьма перспективно и для конструкций порталов, т.к. позволяет сократить массу сооружения и количество стержней (до 50% по сравнению с четырехгранной конструкцией за счет концентрации усилий в меньшем числе элементов) [6, 7]. Треугольная форма имеет ряд преимуществ: большую пространственную жесткость, меньший периметр, меньшую ветровую площадь, меньшее число элементов, а значит – меньшую трудоемкость изготовления, большую коррозионную стойкость за счет концентрации материала и большую надежность. Недостаток треугольной формы (сложная организация крепления раскосов к поясам и траверс к стойке) легко преодолим при использовании трубчатых сечений. Применение труб и элементов круглого сечения также способствует повышению надежности сооружения. При одинаковой с уголком площади поперечного сечения труба имеет существенно большую изгибную жесткость и меньшую площадь боковой (внешней) поверхности. Последнее обстоятельство позволяет снизить расход материалов на антикоррозионную защиту и увеличивает коррозионную стойкость элементов.

Также при выборе сравниваемых вариантов немаловажным является факт повышения требований к внешнему виду конструкций. В последнее время, с учетом строительства в стесненной городской застройке, предъявляются требования как к эстетическому виду конструкций, так и к их компактности.

В данной работе рассмотрены 6 вариантов конструктивных схем порталов:

- 1-й вариант: конструкция портала с четырехгранными решетчатыми секциями, в которых пояса и решетка выполнены из уголков. Соединения элементов портала – жесткие (сварные соединения).

- 2-й вариант: геометрическая схема портала идентична 1-му варианту. Данный вариант представляет собой схему портала с применением болтовых соединений. При составлении расчетной схемы это условие реализовано путем внесения в узлы шарниров.
- 3-й вариант: Пояса секций и траверсы выполнены в виде труб, а решетка – в виде профиля круглого сечения. Соединения элементов портала – жесткие (сварные соединения).
- 4-й вариант: геометрическая схема портала идентична 3-му варианту. Данный вариант представляет собой схему портала с применением болтовых соединений.
- 5-й вариант: Пояса секций выполнены в виде труб, решетка – из профиля круглого сечения, в качестве траверсы используется труба. Соединения элементов портала – жесткие (сварные соединения).
- 6-й вариант: геометрическая схема портала идентична 5-му варианту. Данный вариант представляет собой схему портала с применением болтовых соединений.

Учет шарнирных соединений при выборе сравниваемых вариантов осуществлен по причине появления мощных универсальных вычислительных комплексов (УВК), способных решать поставленную задачу.

Каждый из рассматриваемых вариантов порталов был рассчитан для различных типов проводов (АСО-240, АСО-500) на действие динамических нагрузок, возникающих при мгновенном порыве ветра и обрыве проводов. Вид динамических нагрузок обусловлен характером воздействий на порталы ОРУ.

### Особенности нагрузок и воздействий

Основными нагрузками на конструкции порталов ОРУ являются тяжение проводов и ветровые нагрузки. Гололед, образующийся непосредственно на конструкциях порталов, на их расчете сказывается незначительно. В аварийном режиме конструкции портала рассчитываются на одностороннее тяжение, возникающее при обрыве проводов. Разность тяжений определяется при расчете проводов и тросов.

Конструкции порталов ОРУ подвержены также значительным монтажным и эксплуата-

ционным нагрузкам. Монтаж и установка порталов на фундаменты вызывают своеобразные комбинации усилий в элементах конструкций, зависящие от способа монтажа. Монтаж проводов также изменяет схему работы конструкции.

В условиях открытой местности конструкции порталов, гирлянды изоляторов, провода испытывают повышенную ветровую нагрузку. Колебания проводов в ветровом потоке оказывают ударное воздействие на гирлянды изоляторов, передают динамический импульс с траверсы на стойки. Указанные явления приводят к механическим повреждениям проводов – изломам отдельных проволок в наружных и внутренних повивах, истиранию и вмятинам от ударов распорок в расщепленных фазах. При этом значительные повреждения, связанные с обрывами проводов, разрушением узлов подвески, повреждением элементов конструкций, в большей степени характерные для протяженных участков воздушных линий, – на ОРУ не наблюдаются.

Особую опасность для конструкций порталов несут ударные импульсы на конструкцию при обрыве провода. В механических расчетах порталов ОРУ обрыв провода рассматривается как аварийный режим работы. При этом портал рассчитывается на возникающее одностороннее тяжение проводов. Изучению динамического поведения конструкций при обрывах проводов не уделялось достаточного внимания. Определенные результаты в этой области достигнуты в работах [8-11].

Каскадные разрушения на линиях электропередачи при динамическом характере ветровых воздействий, обуславливают возникновение различных видов колебаний токоведущих проводов, а также появление импульсных нагрузок, действующих на конструкции линейных порталов подстанций. Динамический характер имеют и воздействия на порталы ОРУ, вызванные аэродинамической неустойчивостью токоведущих проводов воздушной линии на участке захода на подстанцию.

При расчетах порталов ОРУ на динамические воздействия ветровой нагрузки допустимо не учитывать влияния подвешенных проводов и тросов ввиду существенной разницы в частотах собственных колебаний. Порталы ОРУ, как

всякие упругие конструкции, являющиеся системами с бесконечным числом степеней свободы, имеют спектр частот собственных колебаний. Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки определяется обычно для каждой частоты (формы) колебаний. Практическое значение для порталов ОРУ, как показывают расчеты, имеет первая (основная) форма колебаний; для отдельных элементов, в верхней части портала, могут оказаться расчетными вторая и третья формы колебаний.

### Исследование усилий в элементах портала ОРУ, возникающих от нагрузок при обрыве проводов

Поведение конструкций портала при обрыве проводов изучалось на примере двухпролетного портала ОРУ-110 кВ для всех 6-ти рассматриваемых вариантов порталов.

Динамические режимы нагружений при обрыве проводов принимались в соответствии с аварийными режимами работы по первой группе предельных состояний, рекомендуемыми ПУЭ.

В расчете использованы следующие допущения: импульс на конструкцию портала от обрыва провода задается в виде треугольника (рис. 2), абсолютная величина которого принимается 1,9 от статического (см. ф-лу (1)); продолжительность импульса определяется по уравнению (2):

$$\bar{T}_d = 1,9 \times \bar{T}_c, \quad (1)$$

$$t_i = \left\{ \begin{array}{ll} 0,2, i_1 & \leq 0,2 \\ i_1, 0,2 & < i_1 \leq 0,4 \\ 0,4, i_1 & > 0,4 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где

$t_i$  – длительность импульса;  $i_1$  – период собственных колебаний по 1-й форме;

$T_d$  – величина импульса при расчете на динамические нагрузки;

$T_c$  – нагрузки, возникающие при статическом нагружении.

Импульс прикладывался в точке подвеса – к траверсе портала в соответствии с рекомен-

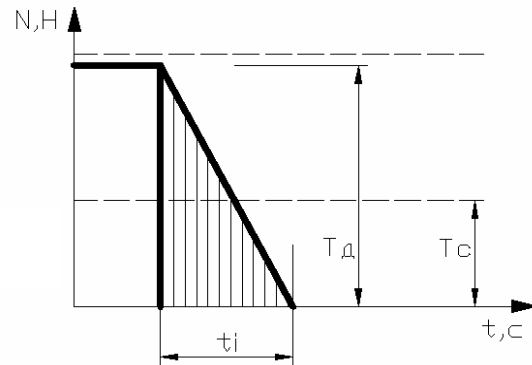


Рис. 2. Форма и продолжительность действия импульса при обрыве провода.

дациями ПУЭ для расчета на динамические нагрузки при аварийном режиме работы.

На рис. 3. представлены результаты расчета по всем рассмотренным конструктивным схемам порталов в виде сравнения (в %-м выражении) усилий в наиболее нагруженных элементах порталов при динамическом расчете и усилий при статическом расчете. За 100% приняты усилия при статическом расчете в соответствующем режиме, регламентированном ПУЭ.

Выполненный расчет на динамические воздействия порталов ОРУ-110 кВ в аварийном режиме показывает, что полученные напряжения значительно превышают результаты, вычисленные по нормативной методике ПУЭ, что свидетельствует о необходимости учета динамических нагрузок от обрыва проводов при проектировании порталов ОРУ. Для некоторых элементов конструкции определяющими являются усилия статического режима, однако в целом для конструкции – усилия, возникающие от действия динамических нагрузок, на порядок выше.

### Исследование усилий в элементах портала ОРУ, возникающих от нагрузок при мгновенном порыве ветра

При расчете конструкций порталов ОРУ-110 кВ на динамическое воздействие ветра использована методика динамических расчетов башенных сооружений электросетевых конструкций с использованием метода конечных

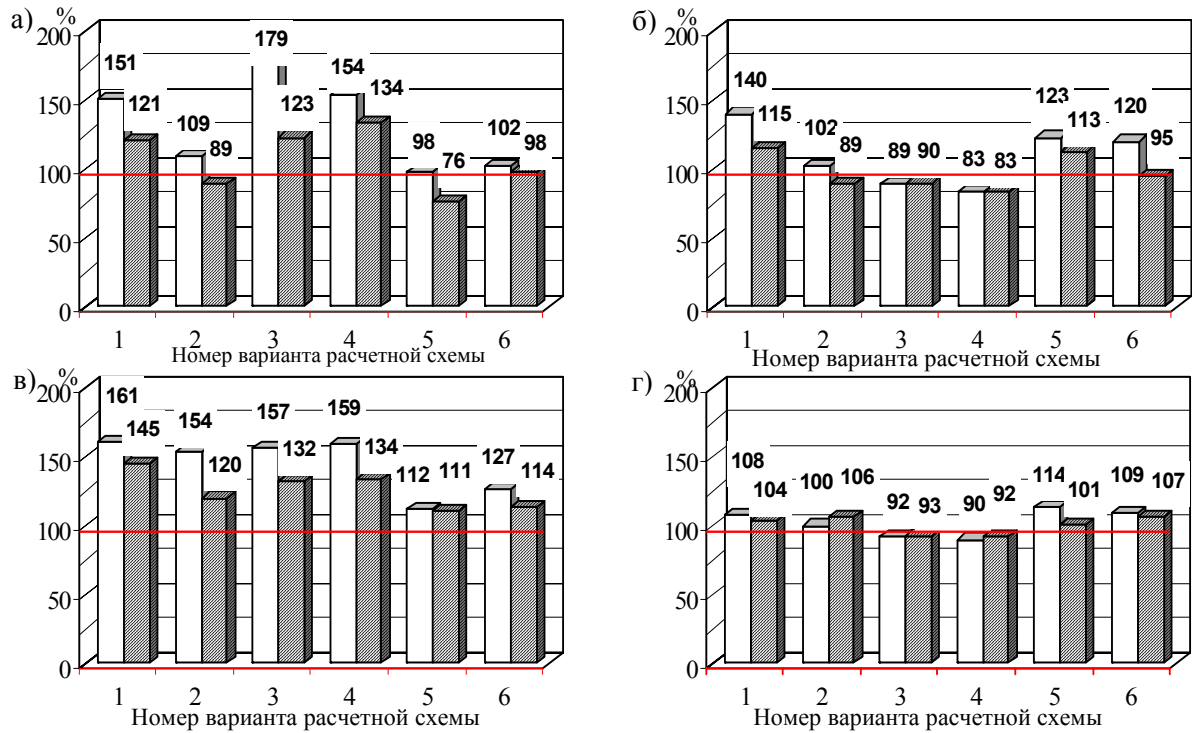


Рис. 3. Усилия в наиболее нагруженных элементах портала ОРУ-110 кВ при динамическом расчете в случае обрыва проводов (в %-м выражении от статических усилий при аварийном режиме):

а – растянутый элемент пояса; б – сжатый элемент пояса; в – растянутый элемент решетки; г – сжатый элемент решетки.

Условные обозначения: – для проводов типа АСО-240; – АСО-500.

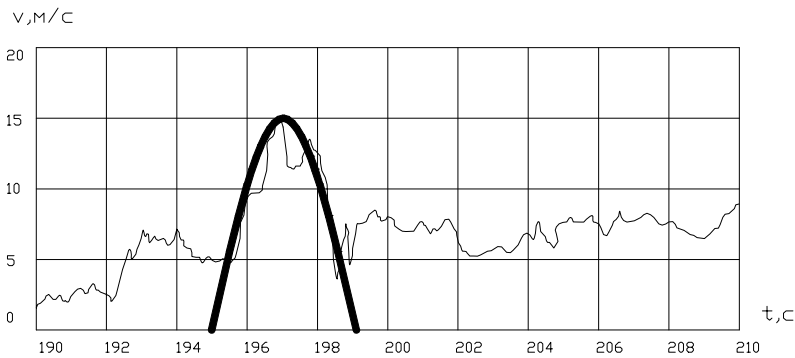


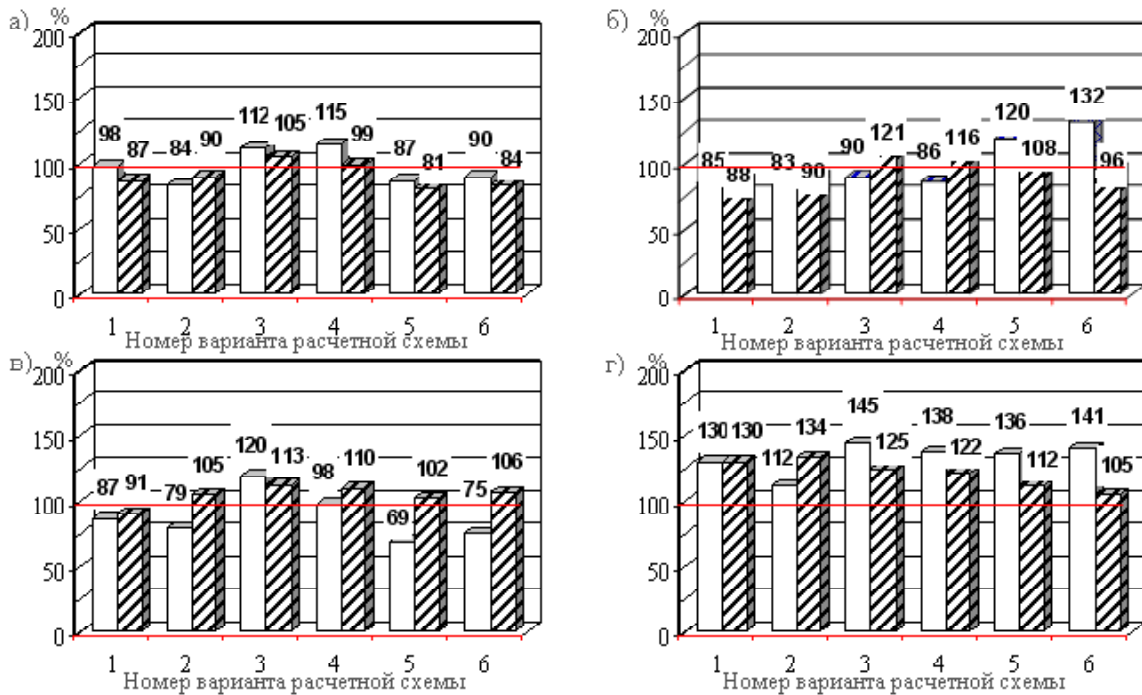
Рис. 4. Аппроксимация ветрового импульса полуволновой синусоиды.

элементов. Расчетные схемы порталов задавались пространственными с жестким и шарнирным креплением раскосов к поясам (см. выше).

Так как отношение осредненной скорости ветра за 2 минуты к мгновенной скорости ветра намного меньше единицы, рассмотрим вариант ветрового нагружения конструкции, когда

осредненная за 2 минуты скорость ветрового потока имеет какое-то значение (статическая нагрузка) и на фоне данной средней скорости имеются аperiodические пульсации ветрового потока (ветровые импульсы).

Согласно принятой методике, на основании записанных реализаций скорости ветра [12], были выбраны наиболее неблагоприят-



**Рис. 5.** Усилия в наиболее нагруженных элементах портала ОРУ-110 кВ при динамическом расчете на мгновенный порыв ветра (в %-м выражении от статических усилий): а – растянутый элемент пояса; б – сжатый элемент пояса; в – растянутый элемент решетки; г – сжатый элемент решетки

**Условные обозначения:** – для проводов типа АСО-240; – АСО-500.

ные сочетания, которые аппроксимировались импульсами, имеющимися в базе данных УВК (рис. 4).

Для расчета конструкции портала на действие ветрового импульса были приняты следующие допущения:

- форма импульса, продолжительность и периодичность были приняты фиксированными, вне зависимости от высоты точки приложения;
- величина импульса изменялась в зависимости от высоты точки приложения согласно логарифмическому закону.

На рис. 5. представлены результаты расчета порталов ОРУ-110 кВ на мгновенный порыв ветра в сравнении с усилиями от ветрового воздействия при статическом расчете.

Применение данной методики основано на сборе статистической информации об особенностях ветрового течения, и в связи с недостатком информации о порывах ветра в настоящее время затруднено. Тем не менее, результаты

проведенных теоретических исследований динамических составляющих усилий в элементах конструкций говорят о занижении нагрузок на конструкции порталов при применении традиционного подхода с 2-х минутным осреднением скорости ветра.

#### **Исследование усилий в элементах портала ОРУ, возникающих от действия короткого замыкания**

Процесс короткого замыкания достаточно хорошо изучен с точки зрения электрических процессов. Из исследований [13-15] установлены электрические характеристики КЗ:

- коэффициент ударного тока;
- продолжительность КЗ.

Значения этих параметров зависят от класса напряжения объекта.

Что касается механических сил, действующих на систему проводов и конструкций при КЗ, обзор литературы показал, что исследова-



ния практически не проводились. Зная электрические характеристики, можно получить механические воздействия от КЗ.

Короткое замыкание в электрической системе приводит к уменьшению суммарного сопротивления внешней цепи по отношению к шинам источников питания, увеличению тока в большинстве ветвей и снижению напряжения в отдельных точках системы. С возникновения КЗ до момента его отключения в ветвях источников и других элементов системы происходит переходный процесс изменения токов и напряжений, вызванный КЗ. Истинный переходный ток при расчете рассматривают состоящим из отдельных составляющих: периодической  $i_n$  и аperiodической  $i_a$ . Мгновенное значение полного тока короткого замыкания для произвольного момента времени определяется по формуле [3]:

$$i_t = i_n + i_a. \quad (3)$$

Периодическая составляющая  $i_n$  по амплитуде одинакова во всех фазах и изменяется в течение переходного процесса с изменением электродвижущей силы (э.д.с.) источника. Аperiodическая составляющая  $i_a$  в общем случае различна для всех фаз и зависит от момента короткого замыкания и предшествующего режима. Для цепей с преобладающим индуктивным сопротивлением наиболее возможное значение аperiodической составляющей имеет место при возникновении КЗ в момент прохождения напряжения источника через нуль. Данное условие обычно принимают за расчетное, так как при нем полный ток КЗ имеет наибольшее значение. Максимальное мгновенное значение полного тока КЗ для указанного расчетного условия (ударный ток  $i_y$ ) наступает при-

близительно через полпериода (0,01 сек) с момента возникновения КЗ.

Ударный ток короткого замыкания определяется по формуле [4]:

$$i_y = \sqrt{2}I'' + i_{a0}e^{\frac{0,01}{T_a}} = k_y\sqrt{2}I'', \quad (4)$$

где  $k_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}}$  – ударный коэффициент;  $I''$  – действующее значение начального сверхпереходного тока.

При определении постоянной времени  $T_a$ , допустимо считать, что при КЗ на крупных подстанциях и т.п. можно принимать  $T_a \approx 0,05$  сек. Среднее значение ударного коэффициента  $k_y$  принимается по кривым [15] равным 1,8, что соответствует  $T_a \approx 0,05$  сек. При этом наибольшее действующее значение тока  $I_y$  (за первый период процесса КЗ) определяется по выражению  $I_y = 1,52I''$  и ударный ток –  $i_y = 1,68I_y$ .

Точные методы расчета короткого замыкания являются весьма сложными и громоздкими. Наибольшее распространение для практических расчетов токов КЗ получил метод расчетных кривых, обеспечивающий достаточную точность при определении тока в месте короткого замыкания.

Для расчета токов КЗ была составлена схема замещения в однолинейном изображении, а для расчета периодической составляющей тока  $I_{*ПКт}$  в месте короткого замыкания для произвольного момента времени  $t$  применен метод кривых. Составленная схема замещения путем соответствующих преобразований приводилась к простейшему виду для определения результирующей э.д.с. и результирующего сопротивления относительно точки короткого замыкания, после чего определялась периодическая составляющая тока в месте короткого замыкания. Результаты сведены в табл. 3 и построен график изменения номинального тока в момент КЗ (рис. 6).

Исходя из того, что имеется зависимость между изменением тока во время короткого замыкания и изменением тяжения, что прямо оказывает влияние на величину и форму импульса – принимаем форму импульса согласно характеру изменения тока при коротком замыкании.

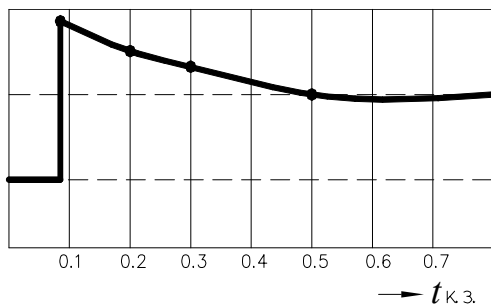


Рис. 6. График изменения тока в момент КЗ.

Таблица 3. Определение  $I_{*ПКт}$  по методу кривых.

$t$ , сек.	0	0,1	0,2	0,5	1,0
$I_{*ПКт}$	1,9	1,65	1,59	1,5	1,52

Так как в базе данных современных расчетных комплексов имеется лишь ограниченное количество возможных форм импульса и нет возможности задать более подробные параметры импульсного воздействия – принимаем форму импульса, для расчета конструкции портала на динамические воздействия согласно форме изменения тока во время короткого замыкания в первые 0,5 секунды возникновения короткого замыкания, в виде треугольника. Импульс приложен в месте крепления провода к траверсе, что соответствует наиболее невыгодному варианту места возникновения короткого замыкания.

Поведение конструкций порталов при КЗ изучалось на примере двухпролетного портала ОРУ-110 кВ (см. рис. 2, б) для всех 6-ти вариантов расчетных схем. Предполагаем, что тяжение во всех пролетах ячейки одинаково, тогда в случае короткого замыкания (рис. 7) на конструкцию будет действовать разница тяжений, возникшая в результате КЗ:

$$\Delta T = T_1 - T_2, \quad (5)$$

Запишем уравнение зависимости между силой короткого замыкания, являющейся функцией температуры и разницей тяжения, возникающей в результате данного короткого замыкания:

$$\Delta T = (T_1 - T_2) \propto \alpha \cdot \Delta t \cdot \gamma, \quad (6)$$

где  $\Delta t = \beta_x \Delta I_{*ПКт}$ ;

$\alpha$  – коэффициент, определяющий физико-механические свойства материала проводов – для алюминия  $\alpha = 0,000024$ ; для стали  $\alpha = 0,000011$ ;

$\beta_x$  – коэффициент, характеризующий увеличение температуры проводника пропорционально проходящего тока, отнесенное к единице длины и тока;

$g$  – поправочный коэффициент.

Ввиду сложности конструктивных особенностей подвески проводов и многообразия применяемых марок, более точное определение

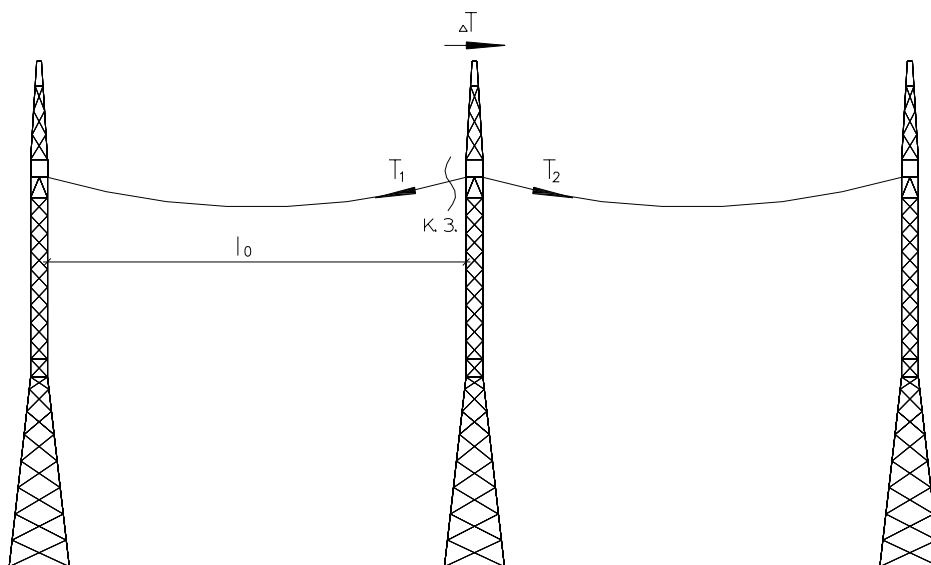
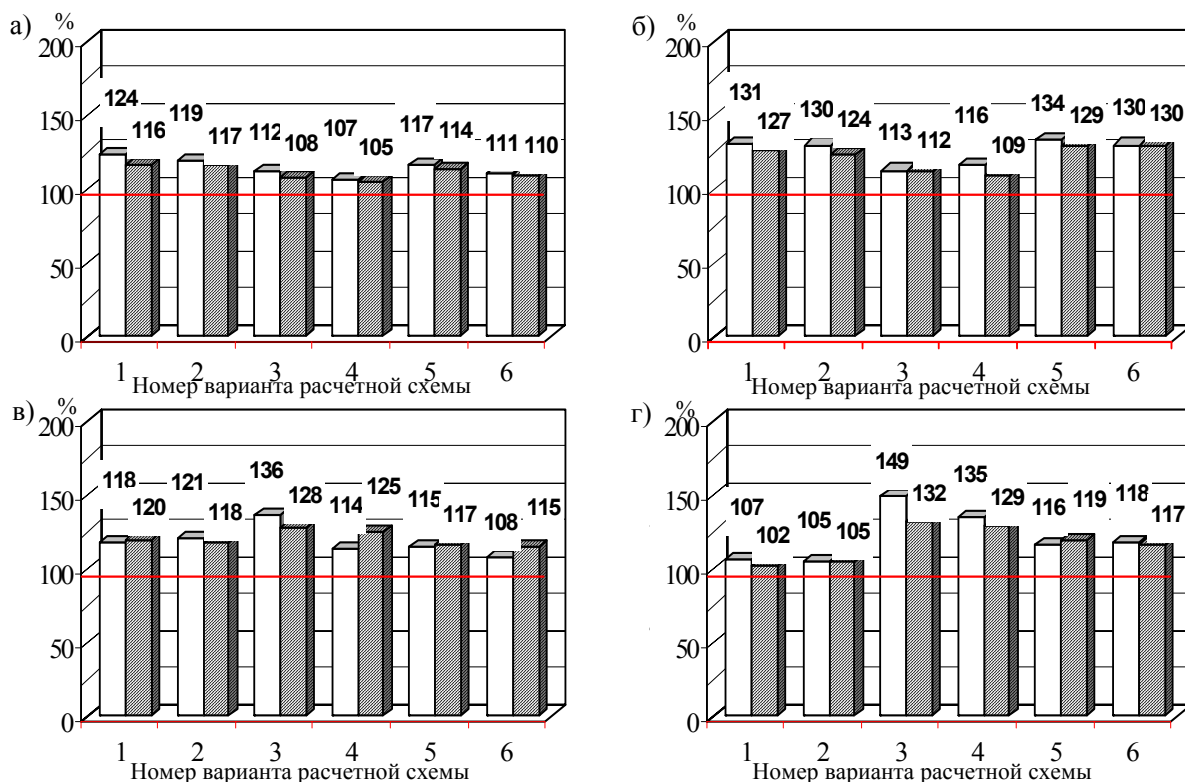


Рис. 7. Расчетная схема ячейки при действии КЗ.



**Рис. 8.** Усилия в наиболее нагруженных элементах портала ОРУ-110 кВ при динамическом расчете при КЗ (в %-м выражении от статических усилий):

а – растянутый элемент пояса; б – сжатый элемент пояса; в – растянутый элемент решетки; г – сжатый элемент решетки

Условные обозначения:  – для проводов типа АСО-240;  – АСО-500.

коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta_x$  требует экспериментальных исследований. В приближении было принято значение  $\alpha$  для стали, как несущей части подвески, а  $\beta_x = 1$ .

Ввиду сложности конструктивных особенностей подвески проводов и многообразия применяемых марок, более точное определение коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta_x$  и  $\gamma$  требует экспериментальных исследований. Выполненные расчеты порталов ОРУ-110 кВ на динамические воздействия от короткого замыкания показали, что усилия в элементах конструкций превышают усилия статического расчета.

Результаты сравнения усилий при расчете портала в статическом и динамическом режимах от действия короткого замыкания приведены на рис. 8.

Представленные результаты расчета по всем рассмотренным конструктивным схемам порталов даны в виде сравнения (в %-м выражении)

усилий в наиболее нагруженных элементах порталов при динамическом расчете на КЗ и усилий при статическом расчете. За 100% приняты усилия при статическом расчете в аварийном режиме, регламентированном ПУЭ.

### Применение БС для изучения НДС электросетевых конструкций

Задача исследования действительной работы элементов электросетевых конструкций в реальном масштабе времени достижима использованием беспроводных передающих устройств (БПУ), работающих в GSM-сетях. Неоспоримым плюсом использования GSM-сетей является возможность контроля состояния исследуемой конструкции на неограниченном расстоянии от базовой станции, куда передается информация о НДС конструкции, климатических параметрах среды и т.д.

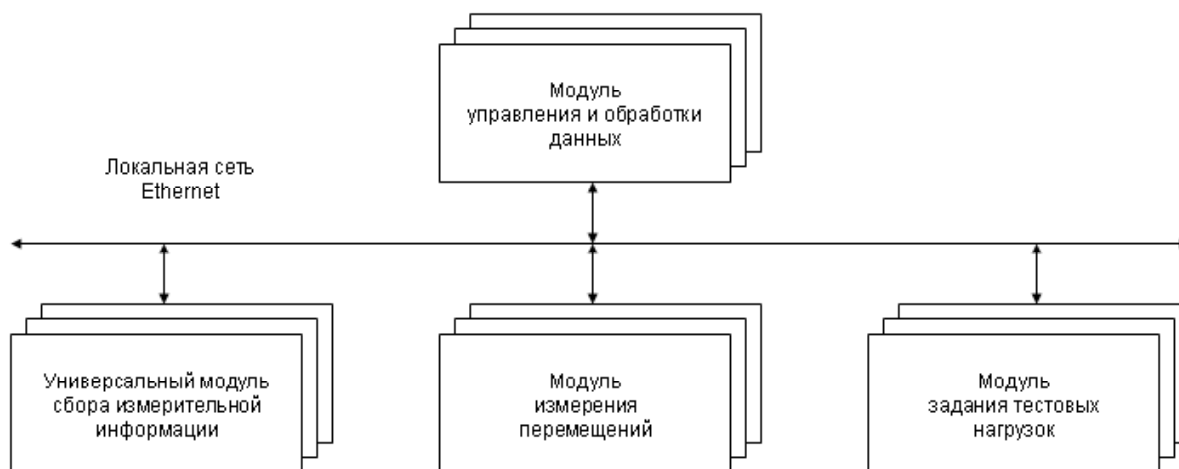


Рис. 9. Структурная схема работы телеметрической системы в локальной сети.

На рис. 9 показана схема работы телеметрической системы в локальной «внутрицеховой» сети [18]. Аналоговый сигнал от тензодатчиков передается на тензопреобразователь и в оцифрованном виде передается на компьютер. Система сравнительно проста и подобные системы получили широкое распространение в промышленной телеметрии, но имеют основной недостаток, присущий всем таким системам – это невозможность использования при диспетчеризации удаленных объектов.

Таким образом, предпочтительным выбором будет какой-либо из видов беспроводной связи. Существуют разнообразные системы связи с использованием радиосигнала: от простейших схем с радиостанциями «Маяк» в качестве приемопередающего устройства до систем с множеством промежуточных ретрансляторов и узлов связи. Тем не менее, создание таких радиосетей требует серьезных вложений на закупку оборудования, лицензирование требуемых для работы диапазонов частот, обучение специалистов по обслуживанию дорогостоящей техники.

С появлением и развитием сетей сотовой связи ситуация изменилась в лучшую сторону. Так, терминальное оборудование сетей GSM стоит на порядок меньше радиостанций, при этом проще в установке и обслуживании, да и радиус действия ограничен только покрытием оператора сети GSM. В итоге, вполне логичным решением в области телеметрии и диспетче-

зации стало использование средств передачи данных через сотовые сети.

Развитие GSM-сетей создало благоприятные условия для появления большого количества устройств, автоматически передающих данные. Обычно они выпускаются в виде электронных плат, обеспечивающих подключение компьютера, внешней антенны и т. п. В одних случаях производители заключают эти платы в корпуса и позиционируют как готовые решения – терминалы. В других – поставляют без корпусов, с тем, чтобы сторонние фирмы могли использовать их в своих разработках [16, 17, 19].

Важной чертой является возможность отключения модуля и включение его в работу, когда это необходимо. Часто GSM модули ориентированы на применение совместно с GPS модулями и используются в автомобильных системах, отсюда соответствие всем требованиям, предъявляемым к оборудованию такого класса – по рабочей температуре ( $-35...85^{\circ}\text{C}$ ), влажности, вибрационной стойкости и т.д. Важным является вопрос разработки программного обеспечения для отдельно взятой научной либо промышленной задачи.

По традиции, задачи промышленной автоматизации включают установку разнообразных контроллеров, имеющих дискретные и аналоговые входы и выходы. Кроме того, контроллеры обычно содержат один или несколько портов RS-485 (для объединения устройств в сети)



Рис. 10. Технологический GSM-контроллер GM9/18-485M.

или (реже) RS-232 (для использования внешних устройств, таких как модемы, или для соединения с компьютерной техникой). Подключение внешнего модема к уже существующей сети устройств на RS-485 сопряжено с определенными трудностями: модем – устройство неинтеллектуальное и адреса не имеющее. Приходится подключать еще одно устройство, имеющее как RS-485, так и RS-232 интерфейсы, и общаться уже с этим устройством по какому-либо протоколу, что довольно громоздко. Рассмотрим другой вариант. На удаленной подстанции установлен электросчетчик (с интерфейсом RS-232). Требуется ежечасный отчет о расходе электроэнергии. Логичным решением стала бы установка интеллектуального контроллера, имеющего 2 порта RS-232 и внешний радиомодем. Тоже не самая простая схема.

Решение напрашивается само собой: объединить программируемый контроллер с GSM-модемом, что и сделала компания «ТЭСС-Электроникс» в своей линейке продуктов серии GM [20] (рис. 10).

Диапазон температур при работе – от -20 до +55 градусов, при хранении – от -40 до +70 градусов. Класс защиты промышленных устройств: IP56 8 дискретных входов типа «сухой контакт» 8 аналоговых входов «токовая петля 4-20 мА» или «токовая петля 0-5 мА», погрешность измерения не более 0,1% от верхнего предела 8 релейных выходов, коммутируемое напряжение не более 100В, коммутируемый ток не более 0,5А, вход внешней антенны (встроенная антенна отсутствует), выход питания +5В

Технические характеристики модуля GSM GM9/18-485M:

Микроконтроллер:	Texas Instruments MSP430F149
Сотовый модуль:	Siemens TC-35
Интерфейс:	RS-232 или RS-485, скорость обмена до 115200 бит/с
Интерфейс:	JTAG для программирования микроконтроллера

(для подключения внешних 5В-устройств), напряжение питания от 9 до 30В, пиковая потребляемая мощность не более 10 Вт.

Как видно из структурной схемы (рис. 11), основой модуля является управляющий микроконтроллер на базе процессора Texas Instruments MSP430F149, в который входят: 60 Кб flash-памяти для хранения программы, 2 Кб ОЗУ (SRAM), два последовательных асинхронных порта (один доступен через внешние интерфейсы модуля, второй занят взаимодействием с сотовым модемом), 12-разрядный 8-канальный АЦП (время преобразования <10 мкс), два 16-разрядных таймера с регистрами сравнения, модули компаратора watchdog, модуль аппаратного умножения, модуль контроля питания (поддерживаются несколько режимов функционирования). Также непосредственно к микропроцессору подключены 32 Кб flash-памяти общего назначения и часы реального времени (RTC). В случае отсутствия внешнего питания часы работают от стандартной литиевой батарейки CR2032. Вторым важнейшим элементом модуля является встроенный сотовый модем Siemens TC-35.

Область применения для GSM Модуль GM9/18-485M практически не ограничена: от промышленных систем сбора данных с удаленных объектов до интеллектуальной системы охраны как частной собственности, так и различных промышленных объектов. С помощью модуля можно дистанционно управлять различными механизмами, получать от них информацию, анализировать ее и передавать в центр управления (рис. 12).

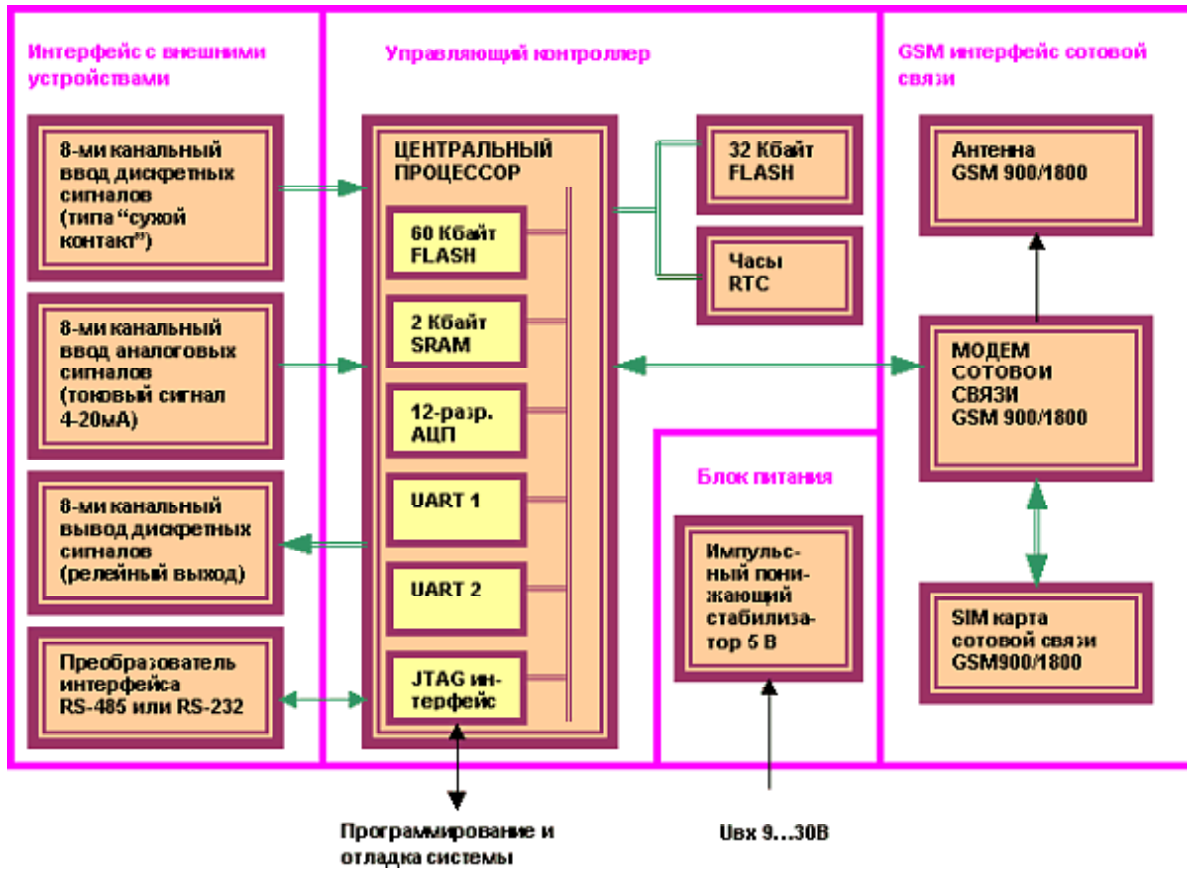


Рис. 11. Структурная схема работы GSM-контроллера.

Принцип работы телеметрической системы в беспроводной сети следующий. Сигнал от тензодатчика преобразуется до стандартного значения (1 В). Далее сигнал передается на аналоговый вход GSM-контроллера. Посредством сети GSM с использованием пакетной передачи данных оцифрованный сигнал передается на базовую станцию. Для приема сигнала достаточно обыкновенного мобильного телефона с помощью дата-кабеля, подключенного к компьютеру. Важным вопросом является разработка программного обеспечения для анализа входящего сигнала. Как правило, компании-производители для этих целей предоставляют свои средства разработки, включающие библиотеку программных модулей, средства отладки, компилятор, а также специальные отладочные платы. Необходимость использования отладочного комплекта для написания и загрузки программ в модуль повышает надежность и конфиденциальность доступа в разрабатываемых системах.

Причина, по которой использование в Украине беспроводных сетей для решения различных научных и промышленных задач до недавнего времени было не актуально – неудовлетворительное покрытие GSM-сетей. В настоящее время наблюдается резкое увеличение интереса к GSM-сетям со стороны промышленного сектора, что и явилось причиной данных исследований.

#### Литература

1. Правила устройства электроустановок/ Минэнерго СССР. 6-е издание переработанное и дополненное. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2 «Передавання електроенергії». Глава 2.5 «Повітряні лінії електропередавання напругою вище 1 кВ до 750 кВ». – К.: ОЕП «ГРІФРЕ». – 2006.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.

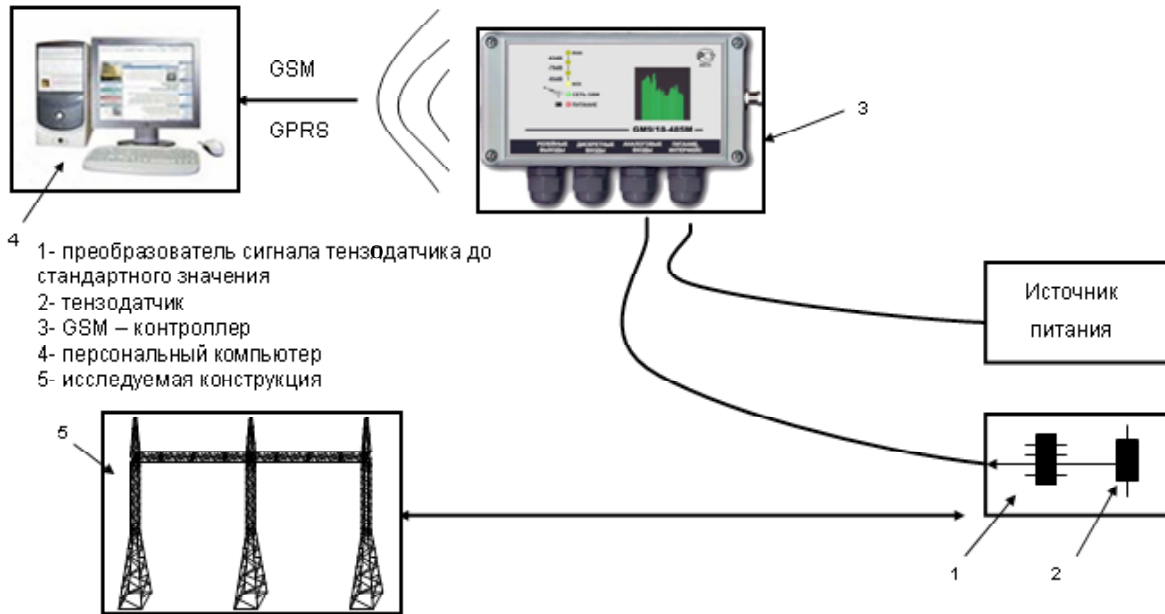


Рис. 12. Вариант применения GSM-контроллера для контроля НДС конструкции.

4. Конспект лекций «Динамические расчеты строительных конструкций» по спецкурсу для магистрантов специальности 8.092104 «Промышленное и гражданское строительство». Сост.: В.В. Кулябко. – Макеевка: ДонНАСА, 2005. – 210 с.
5. Унифицированные стальные порталы открытых распределительных устройств 35-150 кВ. Разработаны СЗО института «Энергосетьпроект». Утверждены Минэнерго СССР 20.11.1973 г. Введены в действие с 1.1.1974 г.
6. Повышение эффективности электросетевого строительства/ А.А. Зевин, К.П. Крюков, А.И. Курносков и др.; Под. ред. Н.Н. Тиходеева. – Л.: Энергоатомиздат. 1991.– 240 с.
7. Самойленко М.Е. Порталы ОРУ с гарантированными показателями безотказности и долговечности Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ ДонГАСА. – Макеевка, 1999. – 190 с.
8. Бошнякович А.Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. – Л.: Энергия, 1975. – 248 с.
9. Горохов Є.В., Назім Я.В. Дослідження впливу імпульсних навантажень на напружено – деформований стан елементів великих переходів повітряних ліній електропередачі // «Наукові записки» АН вищої школи України. вип.2. – К.: Хрещатик, 1999. – С.195-202.
10. Горохов Е.В., Шевченко Е.В., Турбин С.В., Сапронов Ю.В. Исследование напряженно-деформированного состояния опор ВЛ при действии динамических аварийных нагрузок / Вестник ДонГАСА. – Макеевка, 2001. – Вып. 2001-6 (20). – С.16-34.
11. Зевин А.А., Штейн А.В. Определение динамических усилий в элементах линии электропередачи при обрыве провода // Энергетическое строительство. – 1990. – №2. – С.53-55.
12. Горохов Е.В., Некрасов Ю.П., Турбин С.В. Некоторые проблемы исследований взаимодействия приземного слоя атмосферы с электросетевыми конструкциями / Вестник ДонГАСА. – Макеевка, 2000. – Вып. 2000-1 (21). – С.11-13.
13. Маркович М.И. Токи короткого замыкания и устойчивость параллельной работы электрических систем, Госэнергоиздат, 1947.
14. Щедрин Н.Н. Токи короткого замыкания высоковольтных систем, ОНТИ, 1935.
15. Электротехнический справочник/ Под. ред. И.В. Полевого. – М., Госэнергоиздат, 1964.
16. Никишин Д. Продукция Sony Ericsson для беспроводной связи // Вестник электроники. – 2004. – № 2.
17. Щукин А. GSM-модули и модемы компании Sony Ericsson // Электронные компоненты. – 2004. – № 5.
18. Горохов Е.В., Казакевич М.И., Шаповалов С.Н., Назим Я.В. Аэродинамика электросетевых конструкций/ Под редакцией Горохова Е.В., Казакевича М.И. – Донецк, 2000. – 336с.
19. Валентик А., Ермолович А. GSM-модемы// ЭКИС. – Киев: VD MAIS, 2003.
20. www.petrointrade.ru

**Назім Ярослав Вікторович** є доцентом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та довговічність електромережних конструкцій, динамічні впливи на будівельні конструкції електромереж.

**Шанин Дмитро Васильович** є аспірантом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: динамічні впливи на портали відкритих розподільчих установок, надійність будівельних конструкцій.

**Назим Ярослав Викторович** — доцент кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций, динамические нагрузки на строительные конструкции электросетей.

**Шанин Дмитрий Васильевич** — аспирант кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: динамические нагрузки на порталы открытых распределительных устройств, надежность строительных конструкций.

**Nazim Yaroslav Victorovich** is a Docent of Metal Structures department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of Ukrainian Association of Metal Construction. His research interests include the longevity and the reliability of existing metal structures, dynamic loads on structures of overhead lines.

**Shanin Dmitriy Vasil'evich** is a post graduate student of Metal Structures department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. His research interests include the reliability metal structures and dynamic loads on H-frame structure of switch-gears.