

### Анализ результатов испытаний жёсткой ошиновки 110 кВ и выше

ДОЛИН А. П., канд. техн. наук, ЕГОРОВА Л. Е., инженер  
ООО НТЦ ЭДС  
111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14  
apdol@mail.ru

Рассмотрен отечественный опыт производства и внедрения открытых распределительных устройств (ОРУ) с жёсткой ошиновкой. Показаны конструктивные особенности ошиновки различных производителей, в том числе исполнение демпфирующих устройств, шинодержателей, компенсаторов температурных деформаций. Приведены основные условия выбора и методы расчётов жёсткой ошиновки, требования к объёму сертифицированных испытаний, а также результаты экспериментально-аналитических исследований параметров жёсткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ различного исполнения.

**Ключевые слова:** жёсткая ошиновка, шинодержатели, токовые компенсаторы, золотые колебания, ветровой резонанс, ветровая стойкость, ОРУ.

**Ж**ёсткая ошиновка всё более широко применяется в ОРУ, а также в закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) 110 кВ и выше. Использование жёстких шин позволяет создать компактные и экономичные распределительные устройства (РУ), занимающие меньшую площадь и имеющие более низкое расположение шин и порталов, чем в ОРУ с гибкой ошиновкой. Вследствие этого сокращается длина контрольных и силовых кабелей, дорог; облегчаются очистка изоляторов и ремонт шинных конструкций; улучшается обзор шин и аппаратов. Кроме того, при жёсткой ошиновке снижается трудоёмкость монтажных работ. На основе конструкций с жёсткими шинами созданы модули высокой заводской готовности, в том числе комплектные моду-

ли и комплектные подстанции, позволяющие сократить сроки и стоимость сооружения РУ.

Первые конструкции с жёсткими медными и стальными шинами появились в отечественных ОРУ 110 кВ в 30-х годах XX века. В 1950 – 1960-е годы жёсткая ошиновка из меди и алюминия использовалась в ЗРУ 110 и 150 кВ ТЭЦ и ГЭС. В 1960-е годы в ОРУ 110 кВ транзитных и тупиковых подстанций достаточно широко применялась жёсткая трубчатая ошиновка из алюминиевых сплавов. В 70 – 80-е годы XX века построены ОРУ 110 и 220 кВ с жёсткими шинами по схемам сборных шин. В эти же годы Самарским (Куйбышевским) заводом «Электрощит» освоено производство комплектных трансформаторных подстанций КТПБ 110 и 220 кВ по упрощённым

схемам и комплектных РУ блочного типа КРУБ 110 кВ для схем электрических соединений со сборными шинами. Кроме того, на ПС Агадырь были сооружены ОРУ 220 и 500 кВ с жёсткой ошиновкой, разработанные институтом «Энергосетьпроект» и ПО «Союзэлектросетиизоляция».

В последние годы ЗАО «Завод электротехнического оборудования» (ЗЭТО), ЗАО «КЭС – ЭнергоСтрой-Инжиниринг», ЗАО «КТП-Урал», ОАО «Орбита» и другие организации разработали и внедрили ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ (рис. 1). Следует отметить, что ряд шинных конструкций во многом повторяют разработки 1960 – 1980-х годов. Вместе с тем имеется положительный опыт использования и внедрения наилучших зарубежных и новых оригинальных отечественных конструктивных решений.

Успешному внедрению новых конструкций способствовали разработка и введение новых нормативных документов [1 – 4], основанных на опыте эксплуатации, проектирования, экспериментальных и аналитических исследованиях [5 – 8]. В стандартах [1 – 4] определены требования к проектированию, выбору, расчётам и испытаниям жёсткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110 – 500 кВ. В частности, жёсткими выполняются сборные шины, а в ряде случаев и внутриячейковые связи нижнего яруса. В качестве шин рекомендуется использовать трубы из алюминиевых сплавов 1915, 1915Т, АВТ1. Изоляторы применяются как фарфоровые, так и полимерные.

Важнейший элемент современных шинных конструкций — шинодержатели. В настоящее время разработаны различные варианты крепёжных узлов жёсткой ошиновки. В качестве примера на рис. 2, а представлен шинодержатель типа «скоба», который повторяет конструкцию, разработанную в 60 – 70-х годах XX века. Однако всё шире используются более прогрессивные конструкции — шинодержатели обжимного типа, выполненные из



а)

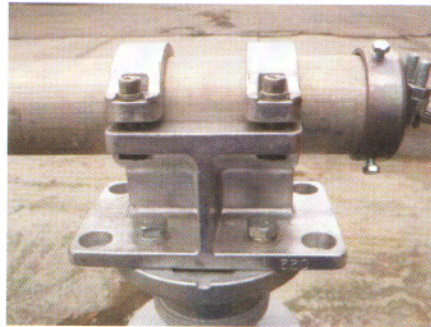


б)

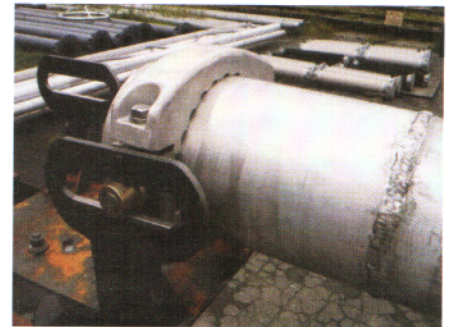
Рис. 1. Современные ОРУ с жёсткой ошиновкой на напряжении 330 кВ производства ЗАО ЗЭТО (а) и 500 кВ производства ЗАО «КЭС – ЭнергоСтрой-Инжиниринг» (б)



а)



б)



в)

Рис. 2. Современные шинодержатели:

а — типа «скоба»; б — из сварных элементов; в — литой с рифлёной внутренней поверхностью

сварных элементов (рис. 2, б) или методом литья (рис. 2, в).

Литые шинодержатели, имеющие рифлёную внутреннюю поверхность (см. рис. 2, в), как правило, позволяют (по сравнению с гладкой внутренней поверхностью) увеличивать рассеяние энергии при колебаниях (например, при золотых вибрациях). Это обеспечивает более эффективное подавление ветровых резонансных колебаний.

Другой важный элемент конструкции — компенсаторы температурных деформаций. Некоторые производители используют устаревшие технические решения (рис. 3, а), где требуется опрессовка гибких связей компенсаторов на монтажной площадке. Аналогичным способом выполняются гибкие ответвления. При этом прессующие зажимы, приваренные к шине на заводе, обуславливают необходимость точной установки шин в соответствии с местом опрессовки.

К сожалению, при небрежном монтаже и транспортировке имели место поломки этих узлов, повлекшие за собой выполнение сварочных работ на месте монтажа. Следует отметить, что сварка в полевых условиях практически всегда приводит к ослаблению прочности узлов и, как следствие, снижению надёжности конструкции. Более современные элементы — это компенсаторы, показанные на рис. 3, б, и ответвления (рис. 4), устанавливаемые с помощью устройств обжимного типа. Изделия

имеют полную заводскую готовность и монтируются с использованием болтовых соединений.

Жёсткая ошиновка ОРУ 110 кВ и выше отвечает нормативным требованиям и удовлетворяет условиям эксплуатационной надёжности, если выполнена проверка (испытания и расчёты), в том числе:

шин по допустимым прогибам от собственной массы (включая ответвления), а в ОРУ, кроме того, от массы гололёда;

изоляционных расстояний с учётом отклонений шин и опорных изоляторов при ветровых нагрузках (в ОРУ) и после воздействия токов КЗ;

ошиновки по условиям короны и радиопомех;

шин, шинодержателей и компенсаторов по допустимым температурным удлинениям;

жёсткой ошиновки по нагреву в рабочих режимах. При этом в ОРУ с учётом солнечной радиации, а также вынужденного (при ветре) или свободно-вынужденного (при штиле) конвективного теплообмена;

термической стойкости шин; электродинамической стойкости изоляторов и шин, включая оценки при неуспешных АПВ;

ветровой стойкости ошиновки ОРУ с учётом пульсирующей (переменной) составляющей ветровой нагрузки; эффективности отстройки шин ОРУ от ветровых резонансов;

стойкости (прочности) изоляторов и шин при различных сочетаниях внеш-

них нагрузок (ветровых, гололёдных и электродинамических) с учётом собственной массы и массы ответвлений, а также прочности заделки проводов, стойкости к воздействию климатических факторов внешней среды и пр.

Следует отметить, что все конструкции жёсткой ошиновки должны подвергаться перечисленным выше испытаниям и отвечать нормативным требованиям. В частности, на электродинамическую стойкость необходимо испытывать трёхпролётные шинные конструкции (допускается испытание и двухпролётных). При этом контрольными являются изоляторы, установленные в середине опытной конструкции. Испытания на электродинамическую стойкость однопролётных конструкций не проводятся.

Испытания на ветровую стойкость, а также проверку на эффективность отстройки от ветровых резонансов выполнять затруднительно, поэтому предложен и эффективно реализован экспериментально-аналитический метод. В соответствии с последним осуществляются испытания и экспериментальное определение логарифмических декрементов затухания шинной конструкции при колебаниях в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также определение жёсткости изоляционных опор. Далее рассчитываются прогибы, напряжения в материале шин, нагрузки на изоляторы, и полученные результаты сопоставляются с допустимыми значениями.

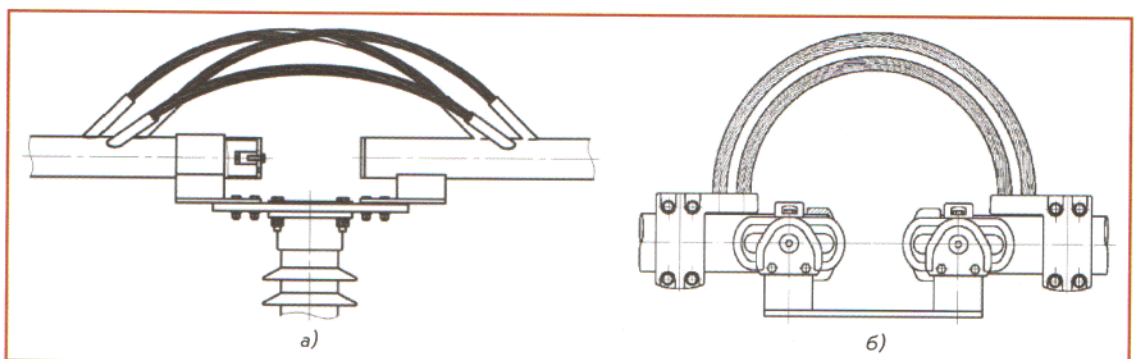


Рис. 3. Компенсаторы температурных деформаций:

а — с использованием прессующих зажимов; б — узел крепления шины обжимного типа



Рис. 4. Крепёжный узел ответвления

Рассмотрим некоторые условия выбора и методики расчёта жёсткой ошиновки.

**Проверка статического прогиба шин.** Наибольший прогиб шин от собственной массы и массы ответвления  $Y_{ст. макс}$  не должен превышать допустимый статический прогиб  $Y_{ст. доп} = l_0/100$ , что выражается следующим условием:

$$Y_{ст. макс} \leq Y_{ст. доп} \quad (1)$$

где  $Y_{ст. доп} = l_0/100$  или с учётом гололёда  $Y_{ст. доп} = l_0/80$  ( $l_0$  — длина шины между опорами (шинодержателями) [2–4]).

**Проверка отстройки от устойчивых ветровых резонансных колебаний.** Ошиновка ОРУ не должна подвергаться устойчивым ветровым резонансным колебаниям, которые возбуждаются периодическими срывами вихрей при скорости ветра в пределах

$$K_1 V_s \leq V \leq K_2 V_s, \quad (2)$$

где  $V_s = df_{1y}/Sh$  — струхалевская скорость ветра, м/с;  $Sh \approx 0,2$  — число Струхалея;  $f_{1y}$  — первая частота собственных колебаний шины в вертикальной плоскости, Гц;  $K_1, K_2$  — коэффициенты, определяющие пределы скоростей ветра при устойчивых резонансных колебаниях, примерно равные соответственно 0,7–1,0 и 1,0–1,3.

Устойчивые резонансные колебания не возбуждаются, если наибольший (расчётный) прогиб шины  $Y_{р. макс}$  при вихревых возбуждениях не достигает критических (допустимых) значений  $Y_{р. доп}$ , т.е. выполняется условие

$$Y_{р. макс} \leq Y_{р. доп} \quad (3)$$

Допустимый прогиб при вихревых возбуждениях находится в пределах 0,02–0,1 диаметра шины  $D$ , а наибольший прогиб зависит от коэффициента подъёмной силы, жёсткости и декремента затухания шины при колебаниях в вертикальной плоскости.

Как показывают исследования и опыт эксплуатации, резонансная скорость ветра невелика и составляет около 2–3 м/с. Напряжения в мате-

риале шины и нагрузки на изоляторы в этом режиме обычно существенно меньше допустимых значений. Однако продолжительность ветровых резонансных колебаний может быть длительной (несколько часов), что оказывает отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, а также может приводить к ослаблению болтовых соединений и усталостным повреждением элементов конструкций.

Наиболее простой метод борьбы с ветровыми резонансными колебаниями — прокладка внутри трубчатых шин проводов (или тросов), металлических стержней, а также использование шинодержателей специальной конструкции. Однако для длиннопролётных шин ОРУ 330 кВ и выше эти мероприятия часто оказываются недостаточными для подавления золотых вибраций. В этих случаях приходится применять специальные демпфирующие устройства.

**Расчёт электродинамической стойкости при неуспешных АПВ.** В системах с быстродействующими АПВ расчёт электродинамической стойкости следует проводить во время повторных включений на КЗ. При этом необходимо учитывать рассеяние энергии в процессе колебаний шинных конструкций, частоту собственных колебаний, время бестоковой паузы и другие факторы. Инженерные оценки максимальной расчётной нагрузки на изоляторы  $R_{max}$  и максимального расчётного напряжения в материале шин  $\sigma_{max}$  при неуспешных АПВ проводятся при наиболее неблагоприятных (по условиям электродинамической стойкости) углах включения и отключения тока КЗ.

Вместе с тем наибольшие напряжения в шине, нагрузки на изоляторы, а также прогибы конструкций при повторных включениях на КЗ не превышают соответствующих значений при первом КЗ, если продолжительность бестоковой паузы (БП), с, составляет:

$$t_{БП} \geq \frac{2,3}{f_1 \delta_x}, \quad (4)$$

где  $f_1, \delta_x$  — соответственно частота собственных колебаний и декремент затухания, Гц, в горизонтальной плоскости.

Если условие (4) не выполняется, проводится расчёт параметров  $R_{max}$ ,  $\sigma_{max}$  согласно требованиям [1, 4]. Шинные конструкции отвечают условиям стойкости (прочности) при соблюдении следующих неравенств:

$$R_{max} \leq R_{доп}, \quad \sigma_{max} \leq \sigma_{доп}, \quad (5)$$

где  $R_{max}, R_{доп}$  — максимальная расчётная и допустимая нагрузки на изолято-

ры;  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{доп}$  — максимальное расчётное и допустимое напряжения в материале шин.

Для шин со сварными соединениями, помимо условий (4) и (5), должно выполняться неравенство

$$\sigma_{max св} \leq \sigma_{доп. св} \quad (6)$$

где  $\sigma_{max св}$  — максимальное расчётное напряжение в области сварного шва шины;  $\sigma_{доп. св}$  — допустимое напряжение с учётом снижения прочности после сварки, равное  $0,7\sigma_{в. св}$  (временного сопротивления материала шины в зоне сварного шва).

**Расчёт шин на ветровую стойкость.** Здесь учитываются как статическая (неизменная во времени)  $\bar{V}$ , так и динамическая (пульсирующая)  $v(t)$  составляющие скорости ветра:

$$V = \bar{V} + v(t). \quad (7)$$

Динамические составляющие скорости ветра и, следовательно, ветровой нагрузки рассматриваются как стационарные случайные процессы [8]. В результате расчёта наибольшую нагрузку на опору и напряжение в шине можно представить в следующем виде:

$$R_{max в} = q_{ст. в} / \eta_{в}; \quad \sigma_{max в} = \frac{q_{ст. в} l^2}{\lambda W} \eta_{в}, \quad (8)$$

где  $q_{ст. в} = 0,5\rho_v c_x D V_0^2$  — статическая составляющая ветровой нагрузки, Н/м ( $\rho_v$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  — внешний диаметр шины, м;  $c_x$  — коэффициент лобового сопротивления шины;  $V_0$  — нормативная скорость ветра на высоте шины, м/с);  $l$  — длина пролёта шины;  $\eta_{в}$  — динамический коэффициент ветровой нагрузки, зависящий от частоты собственных колебаний и декремента затухания ошиновки, а также от скорости ветра [4];  $\lambda$  — параметр, зависящий от условий опирания шин на изоляторы (опоры) пролёта, а также от числа опор;  $W$  — момент сопротивления поперечного сечения шины, м<sup>3</sup>.

**Расчёт изоляторов и шин на прочность при сочетании нагрузок.** Этот расчёт при сочетании ветровых  $q_{в}$ , гололёдных  $q_r$  и электродинамических  $q_{э}$  нагрузок, а также нагрузок от собственной массы и массы ответвлений  $q_{ш}$  проводится при следующем результирующем воздействии (в векторной форме):

$$\bar{q}_{\Sigma} = \gamma_1 \bar{q}_{в} + \gamma_2 \bar{q}_r + \gamma_3 \bar{q}_{э} + \bar{q}_{ш}, \quad (9)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  — коэффициенты, принимаемые в соответствии с рекомендациями [4, 9] и другими документами.

| Номинальное напряжение $U$ , кВ | Внешний (внутренний) диаметр шины $D$ ( $d$ ), мм | Длина пролёта шины $l$ , м | Шинодержатель                         | Демпфер  | Декремент затухания, Гц, в вертикальной плоскости $\delta_y$ | Декремент затухания, Гц, в горизонтальной плоскости $\delta_x$ | Соответствие требованиям |     |     |     |
|---------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|--|--|--|--------------------------|-----|-----|-----|
|                                 |   |                            |                                       |  |  |  | 1                        | 2   | 3   | 4   |
| 110                             | 80 (60)   | 9                          | Литой обжимного типа                  | Стержень   | 0,042  | 0,073  | +                        | +   | +   | -   |
| 110                             | 100 (90)  | 9                          | Сварной обжимного типа «Исполнение 1» | Провод А185  | 0,045  | 0,495  | +                        | -   | -   | -   |
|                                 |   |                            |                                       | Пруток   | 0,036  | 0,209  | +                        | -   | -   | -   |
|                                 |   |                            | Сварной обжимного типа «Исполнение 2» | —»—  | 0,078  | 0,193  | +                        | +   | +   | +   |
| 220                             | 120 (112)   | 15,4                       | Литой обжимного типа                  | Провод АС-150/34   | 0,080  | 0,230  | -                        | Нет | Нет | Нет |
| 220                             | 160 (150)   | 15,4                       | То же                                 | Провод АС-500/26   | 0,150  | 0,314  | +                        | +   | +   | +   |
| 330                             | 220 (212)   | 17,1                       | —»—                                   | Четыре провода   | 0,032  | 0,534  | +                        | +   | -   | -   |
| 500                             | 220 (212)   | 17,1                       | —»—                                   | Четыре провода АС-500/27 и демпфер производства ЗАО ЗЭТО | 0,124  | 0,362  | +                        | +   | +   | +   |
| 500                             | 220 (210)   | 19                         | —»—                                   | Провод АС 630/43,6                                       | 0,068  | 0,445  | +                        | -   | -   | -   |
| 500                             | 220 (204)   | 19                         | —»—                                   | Провод АС 630/43,6                                       | 0,060  | 0,400  | +                        | -   | +   | +   |

Примечания: 1. В таблице приведены позиции, означающие: 1 — допустимые прогибы от силы тяжести ошиновки, а также при сочетании силы тяжести ошиновки и гололёда; 2 — отстройка жёсткой ошиновки от ветровых резонансов; 3 — электродинамическая стойкость ошиновки при неуспешных АПВ; 4 — стойкость (прочность) ошиновки при сочетании нагрузок. 2. Обозначения «+» и «-» указывают на соответствие требованиям или на их невыполнение.

Изоляторы и шины ОРУ должны рассчитываться на прочность при следующих сочетаниях внешних нагрузок:

сила тяжести ошиновки, нормативная гололедная нагрузка и ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра;

сила тяжести ошиновки, ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра и электродинамическая нагрузка (без учёта АПВ), равная 65 % максимального расчётного значения (т.е. при токе КЗ, равном 80 % максимума);

сила тяжести ошиновки, максимальная электродинамическая нагрузка (без учёта АПВ) и ветровая нагрузка, равная 60 % нормативного значения;

сила тяжести ошиновки и электродинамическая нагрузка при максимальном расчётном токе КЗ, в том числе при неуспешных АПВ (повторных включениях на КЗ).

Испытания и расчёты шинных конструкций позволили определить влияние конструктивных факторов на логарифмический декремент затухания и, как следствие, на эффективность отстройки от ветровых резонансов и на электродинамическую стойкость при неуспешных АПВ. Было исследовано влияние узлов крепления и различных типов демпферов жёсткой ошиновки 110 – 500 кВ на ветровой резонанс, ветровую стойкость и другие параметры. Результаты некоторых испытаний и расчётов опытно-экспериментальных конструкций с жёсткой оши-

новкой ОРУ 110 – 500 кВ заводского изготовления, а также их опытных образцов приведены в таблице.

Из таблицы следует, что логарифмический декремент затухания в значительной степени зависит от типа демпфирующего устройства, а также в ряде случаев — от типа шинодержателей.

#### Выводы

1. Увеличение рассеяния энергии за счёт изменения конструкций шинодержателей и применения более эффективных демпфирующих устройств — наиболее эффективный способ отстройки от устойчивых ветровых резонансных колебаний.

2. В ряде случаев определяющим для выбора прочности изоляторов является условие электродинамической стойкости при неуспешных АПВ.

3. Электродинамическая стойкость при повторных включениях на КЗ определяется при наиболее неблагоприятных условиях, в том числе длительности КЗ и угле включения тока КЗ [1, 4]. Учёт реальной продолжительности КЗ для РУ с современными элегазовыми выключателями позволяет снизить расчётные значения наибольших нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин, а также обосновать использование более экономичных решений без снижения требований надёжности к ошиновке.

4. Надёжность жёсткой ошиновки обеспечивается качеством её изготов-

ления и монтажа, а также строгим выполнением требований нормативных документов [1 – 4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 50736–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта электродинамического и термического действия тока КЗ. 1994.
- СТО 56947007-29.240.10.028–2009 «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35 – 750 кВ». — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
- СТО 56947007-29.060.10.005–2008. Руководящий документ по проектированию жёсткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2008.
- СТО 56947007-29.060.10.006–2008. Методические указания по расчёту и испытаниям жёсткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2008.
- Долин А. П., Шонгин Г. Ф. Открытые распределительные устройства с жёсткой ошиновкой. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчёт жёсткой ошиновки распределительных устройств. — М.: Энергия, 1981.
- Долин А. П., Кудрявцев Е. П., Козина М. А. Расчёт электродинамической стойкости и других параметров жёсткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений // Электрические станции. 2005. № 4. С. 49 – 53.
- Долин А. П. Исследование стойкости жёсткой ошиновки при ветровых нагрузках // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1990. № 4. С. 57 – 66.

## Поправка

В журнале «Энергетик» № 7 за 2010 год на странице 5 в адресе автора статьи Ростика Г. В. указана улица «Кондратьевский проезд».

Следует читать: Кондратьевский проспект.