

# **Электрические трансформаторы**

**Устройства регулирования напряжения**

# БАЛАНСЫ МОЩНОСТЕЙ И ИХ СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

- Основными особенностями электроэнергетических систем и систем электроснабжения являются:
  - практическая невозможность накопления электроэнергии, мощности современных аккумуляторных батарей неизмеримо меньше мощностей генерирующих источников;
  - практически мгновенная передача электроэнергии потребителям от генерирующих источников в связи с высокой скоростью распространения электромагнитных волн.
- Эти особенности определяют **одновременность** процессов производства и потребления электроэнергии и **равенство величин вырабатываемой и потребляемой электроэнергии в каждый момент времени.**
- **Уровни напряжений** в различных точках сети **могут различаться очень сильно** и одновременно в одних узлах сетей соответствовать, а в других не соответствовать требованиям ГОСТов.

# Уравнения балансов по активной и реактивной мощности

- В каждый момент установившегося режима в электроэнергетической системе существуют балансы по активной и реактивной мощности.

$$\sum P_{\Sigma} = \sum P_{H} + \sum \Delta P_{C} + \sum \Delta P_{CH}$$

$$\sum Q_{\Sigma} = \sum Q_{H} + \sum \Delta Q_{C} + \sum \Delta Q_{CH} - \sum Q_{КУ}$$

где (г) - суммарные активные и реактивные мощности генерирующих источников; (н) — суммарные активные и реактивные мощности нагрузок; (с)— суммарные потери мощности в элементах систем электроснабжения и электроэнергетической системы; (сн) — суммарные расходы мощности на собственные нужды электростанций; (ку) — суммарные мощности компенсирующих устройств.

- **Балансы мощностей в энергосистеме** существуют в установившихся режимах, которые характеризуются определенными значениями **частоты** переменного тока  $f$  и **напряжений** в узлах сети  $U$ , в том числе на шинах потребителя.
- **При нарушениях балансов мощностей** в энергосистеме происходят нарушения установившихся режимов и начинаются переходные процессы, которые заканчиваются **новыми установившимися режимами с новыми значениями  $f_1$  и  $U_1$** .
- **Нарушение баланса в системе**, а следовательно, и изменение параметров качества электроэнергии происходит как **при изменении нагрузки**, так и **изменении генерации**.

- Рост  $\Sigma P_n$  приводит к снижению частоты.
- Рост  $\Sigma Q_n$ , в основном, приводит к снижению напряжения.
- *По содержанию рост нагрузок в энергосистеме равносителен снижению генерации.*
- Обеспечение допустимых отклонений частоты и напряжения *обуславливают необходимость мероприятий по регулированию баланса мощностей.*
- **Баланс реактивной мощности** по системе определяет **средний уровень** напряжений в ЕНЭС.
- Однако уровень напряжений в целом по энергосистеме **не гарантирует требуемых уровней напряжений во всех узлах сети.**
- Следовательно, **баланс реактивной мощности следует проверять** не только по системе в целом, но и по **отдельным ее районам** и использовать кроме централизованного регулирования напряжения **местное.**

# Влияние отклонений напряжения на работу электроприемников и энергосистем

- Каждый **электроприемник имеет наилучшие технико-экономические показатели при определенном оптимальном напряжении на его зажимах.**
- Отклонение напряжения от оптимального приводит к изменению технико-экономических показателей приемников электрической энергии.
- **При изменении напряжения меняются также показатели самой сети** — в основном за счет изменения потерь мощности и энергии.
- Таким образом, отклонения напряжения в отдельных точках сети оказывают влияние на всю систему электроснабжения потребителей.

# Влияние отклонений напряжения на работу электродвигателей

- При отклонениях напряжения на выводах АД изменяется:
  - **частота вращения ротора;**
  - **потери мощности;**
  - **потребление реактивной мощности.**
- При изменении напряжения изменяется механическая характеристика АД – зависимость его вращающего момента от скольжения или частоты вращения.
- Для асинхронных двигателей вращающий момент пропорционален квадрату напряжения.
- Для синхронных двигателей вращающий момент пропорционален подводимому напряжению.
- Следовательно при пониженном напряжении уменьшается производительность механизмов, что приводит к технологическому ущербу.
- При значительном снижении напряжения  **$M_c$  может превысить  $M_d$** , что приводит к «**опрокидыванию**» двигателя, т.е. его остановке.
- Снижение напряжения ухудшает условия пуска.

# Влияние отклонений напряжения на работу электродвигателей

- Если ЭД длительно работает при пониженном напряжении, т.е. в режиме перегрузки, то из-за ускоренного износа изоляции **снижается его срок службы**.
- При отклонении напряжения на **-10%**, ток ЭД **превышает на 10%  $I_n$** , что вызывает перегрев изоляции.
- Превышения напряжения также приводят к снижению срока службы из-за **теплового старения изоляции** (*ДП пропорциональны квадрату напряжения*):

$$P_a = U^2 \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$$

- С точки зрения нагрева ЭД **более опасны отрицательные отклонения напряжения**.
- **Повышение напряжения** на выводах ЭД приводят к увеличению **потребляемой реактивной мощности** (на каждый процент увеличения напряжения реактивная мощность увеличивается на 3%).

# Влияние отклонений напряжения на работу остальных ЭП

- **При повышении напряжения:**
  - **уменьшается срок службы ламп** (например, ЛН в 5 раз при увеличении напряжения на 10 %);
  - **увеличивается ток холостого хода трансформаторов**, что приводит к перегреву сердечников трансформаторов;
  - **увеличивается потребление** реактивной мощности вентильными преобразователями (**на 1...1,5 % при повышении напряжения на 1 %**).
- **При снижении напряжения:**
  - уменьшается световой поток источников света, что приводит к уменьшению освещенности рабочих мест и снижению производительности труда.
  - при отжиге заготовок в печах сопротивления в случае снижения напряжения технологический процесс продолжается дольше;
  - возникает перерасход электроэнергии за счет удлинения технологического процесса электропечей (**в 1,5 раза при снижении напряжения на 7 %**).
  - **при снижении напряжения на 10 % процесс отжига производить невозможно.**

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

- Под регулированием напряжения понимается **комплекс технических мероприятий по ограничению отклонений напряжений** от их номинальных значений на шинах потребителей электроэнергии в допустимых пределах.
- Регулирование напряжений выполняется в системообразующей и распределительных сетях электроэнергетических систем с целью обеспечения экономичной и надежной работы энергетического оборудования и поддержания напряжений в узлах сети в технически допустимых границах.
- Таким образом, **регулирование напряжений производится как в системах электроснабжения потребителей, так и в сетях электроэнергетических систем.**

# Централизованное и местное регулирование напряжения

- **Регулирование напряжения** связано с **балансом реактивной мощности** в сети и на шинах потребителей электроэнергии.
- Пониженные уровни напряжений наблюдаются, как правило, в районах с дефицитом реактивной мощности.
- **При централизованном регулировании** в питающем узле одновременно **поддерживаются допустимые уровни напряжения в целом для группы потребителей близлежащего района.**
- **Местное регулирование** предполагает поддержание требуемых уровней напряжения непосредственно **на шинах потребителя.**

- Современные отечественные электрические системы характеризуются **многоступенчатой трансформацией** и все **увеличивающейся длиной линий** различных напряжений.
- Суммарная величина потерь напряжения при передаче электроэнергии от источников до электроприемников получается весьма большой.
- **При изменении значений нагрузок** от наименьших до наибольших суммарные **потери напряжения также изменяются.**
- В результате на зажимах электроприемников имеет место изменение напряжения в весьма значительных пределах, существенно превышающих допустимые.
- В этих условиях **нельзя обеспечить требуемое качество напряжения без применения специальных регулирующих устройств.**

## Средства регулирования напряжения

- Средствами регулирования напряжения могут служить:
  - **генераторы** на электростанциях;
  - **трансформаторы** с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (**РПН**) и без нагрузки (**ПБВ**);
  - **вольтдобавочные трансформаторы и линейные регуляторы**;
  - **компенсирующие устройства, вырабатывающие реактивную мощность** (батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы в перевозбужденном режиме);
  - **компенсирующие устройства, потребляющие реактивную мощность** (реакторы, синхронные компенсаторы в недовозбужденном режиме).

## Регулирование напряжения с помощью трансформаторов

- Для регулирования напряжения с целью поддержания требуемых ГОСТ уровней напряжений на шинах потребителей и обеспечения экономичных режимов работы электрической сети **необходимо изменять коэффициенты трансформации трансформаторов.**
- Поэтому понижающие трансформаторы и автотрансформаторы изготавливаются с **возможностью изменения коэффициента трансформации в пределах 10...20 %.**
- Регулировочные ответвления (*анцапфы*) выполняются обычно с питающей стороны, то есть **на стороне высшего напряжения** понижающих трансформаторов (ВН), если класс высшего номинального **напряжения не превышает 220 кВ.**

## Изменение коэффициента трансформации

- **Изменение коэффициента трансформации достигается изменением числа витков одной из обмоток трансформатора, снабженной, помимо основных, дополнительными регулировочными ответвлениями.**
- При этом ответвления (отпайки) со знаком «+» позволяют увеличить число витков соответствующей обмотки, а со знаком «-» — уменьшить.
- Номинальный коэффициент трансформации:  
$$K_T = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}$$

- При изменении числа витков обмотки трансформатора переключением регулировочных ответвлений коэффициент трансформации меняется и определяется по формуле:

$$K_T = \frac{U_{BH} \pm n \cdot k\%}{U_{HH}}$$

- где  $n$  — общее число регулировочных ответвлений в сторону увеличения или уменьшения числа витков обмотки трансформатора,  $k\%$  — цена одного ответвления в процентах от высшего номинального напряжения  $U_{BH}$ .

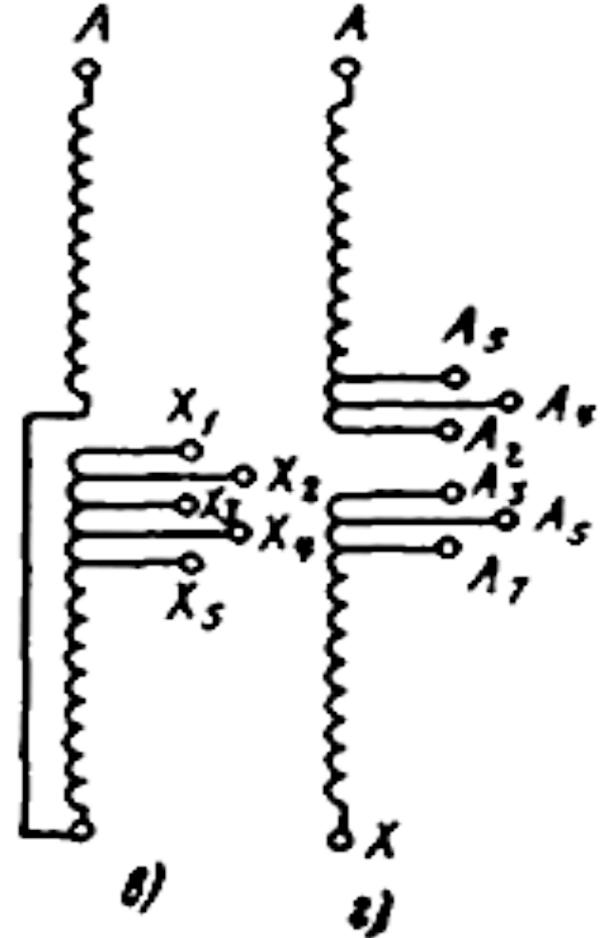
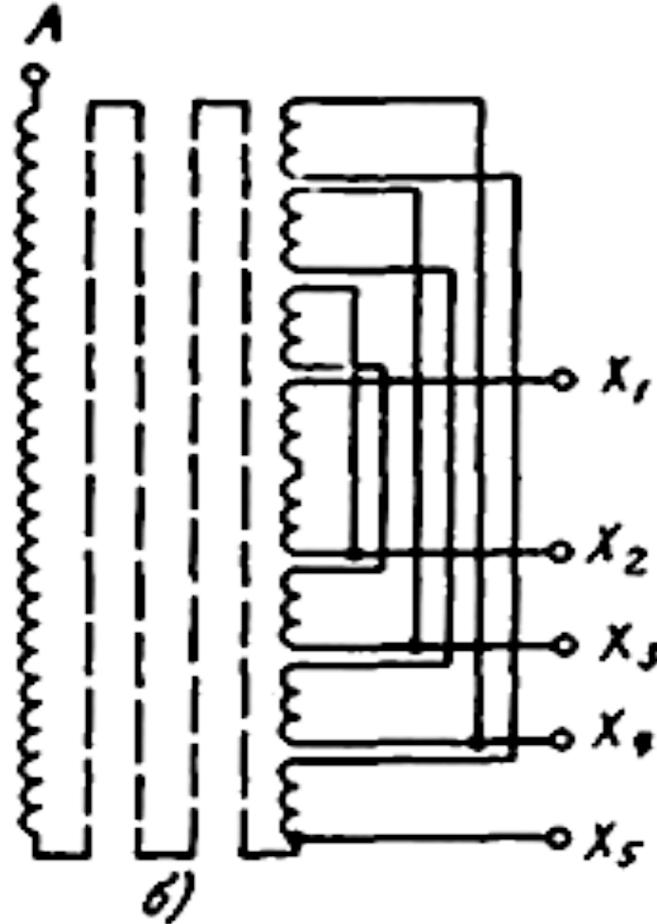
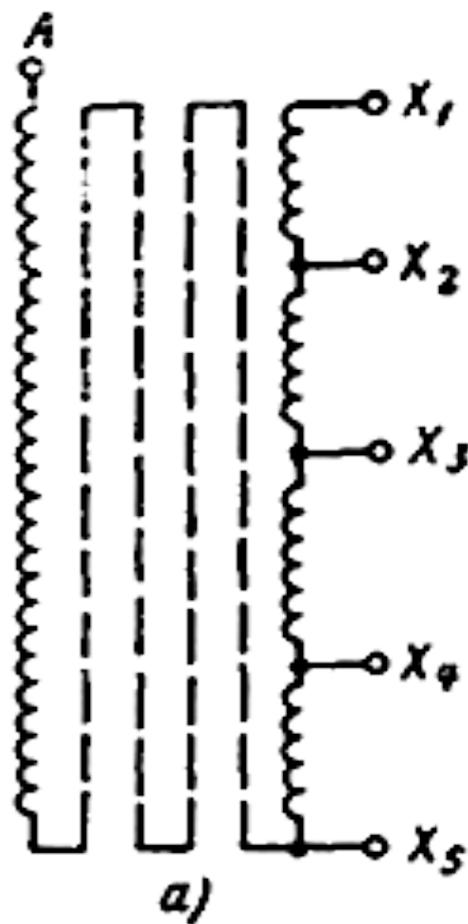
## Расположение регулировочных устройств

- Расположение регулировочных устройств со стороны высшего напряжения понижающего трансформатора облегчает переключающее устройство по сравнению с устройством переключения ответвлений, устанавливаемом на стороне низшего напряжения.
- Это связано с тем, что **токи в обмотках высшего напряжения** трансформаторов **меньше токов в обмотках низшего напряжения** и соотносятся обратно пропорционально напряжениям на обмотках.
- При высшем номинальном напряжении, **превышающем 220 кВ**, возникают сложности с изоляцией переключающего устройства, что предопределяет его перенос **на сторону среднего напряжения**.
- По конструктивному выполнению переключающих устройств различают трансформаторы с **ПВВ** и **РПН**.

## Трансформаторы с ПБВ

- Трансформаторы с ПБВ (переключением без возбуждения) необходимо **отключать от сети** для переключения регулировочных ответвлений.
- Устройство ПБВ не позволяет регулировать напряжение в течение суток, так как это потребовало бы частого отключения трансформатора, для переключения ответвлений, что по условиям эксплуатации недопустимо.
- Обычно ПБВ используется только для сезонного регулирования напряжения.
- **Трансформаторы с ПБВ** в настоящее время выполняются с **основным (0) и четырьмя дополнительными ответвлениями (-5 %; -2,5 %; +2,5 %; +5 %).**
- Переключение ответвлений обмоток должно производиться специальными переключателями, встроенными в трансформатор, с выведенными из бака рукоятками управления.
- Для переключения регулировочных ответвлений трансформатор отключается от сети, круговой переключатель переводится в нужное положение и трансформатор включается в сеть.

# Схемы размещения регулировочных ответвлений в трансформаторах с ПБВ



## Характеристика схем регулирования напряжения ПБВ

- а) Схемы регулирования напряжения вблизи нулевой точки при соединении обмотки в звезду допускают применение наиболее простого и дешевого переключателя — **одного на три фазы трансформатора**. В этих схемах рабочее напряжение между отдельными частями переключателя *не превышает 10 % линейного напряжения* трансформатора.
- **Схема а)** для регулирования напряжения при многослойной цилиндрической обмотке применяется в трансформаторах *мощностью до 160 кВА*.
- б) В трансформаторах мощностью **от 250 кВА** и выше механические силы, действующие на отдельные витки при коротком замыкании трансформатора могут быть опасными и регулировочные витки обмотки ВН, обычно располагаемые в ее наружном слое, рекомендуется размещать симметрично относительно середины высоты обмотки.
- Намотка регулировочных витков производится тем же проводом и с тем же направлением намотки, что и основных витков обмотки.

## Характеристика схем регулирования напряжения ПБВ

- По **схеме в)** может выполняться регулирование напряжения при многослойной цилиндрической катушечной и непрерывной катушечной обмотке при номинальном напряжении **до 38,5 кВ.**
- При этом одна половина обмотки мотается правой, а другая левой намоткой.
- Данный способ регулирования напряжения используется для трансформаторов мощностью **до 1000 кВА.**
- В **схеме г)** часто применяют отдельные переключатели для обмотки каждой фазы трансформатора.

# Трансформаторы со встроенным устройством РПН

- Трансформаторы с **РПН (регулирование под нагрузкой)** **не требуют отключения от сети** для переключения регулировочных ответвлений.
- **Трансформаторы со встроенным устройством РПН** отличаются от трансформаторов с ПБВ наличием **специального устройства переключения анцапф** под нагрузкой без отключения трансформатора от сети.
- Обмотка, на которой расположено РПН, выполняется из двух частей:
  - **нерегулируемой или основной «а»;**
  - **регулируемой «б».**

# Схема устройства РПН

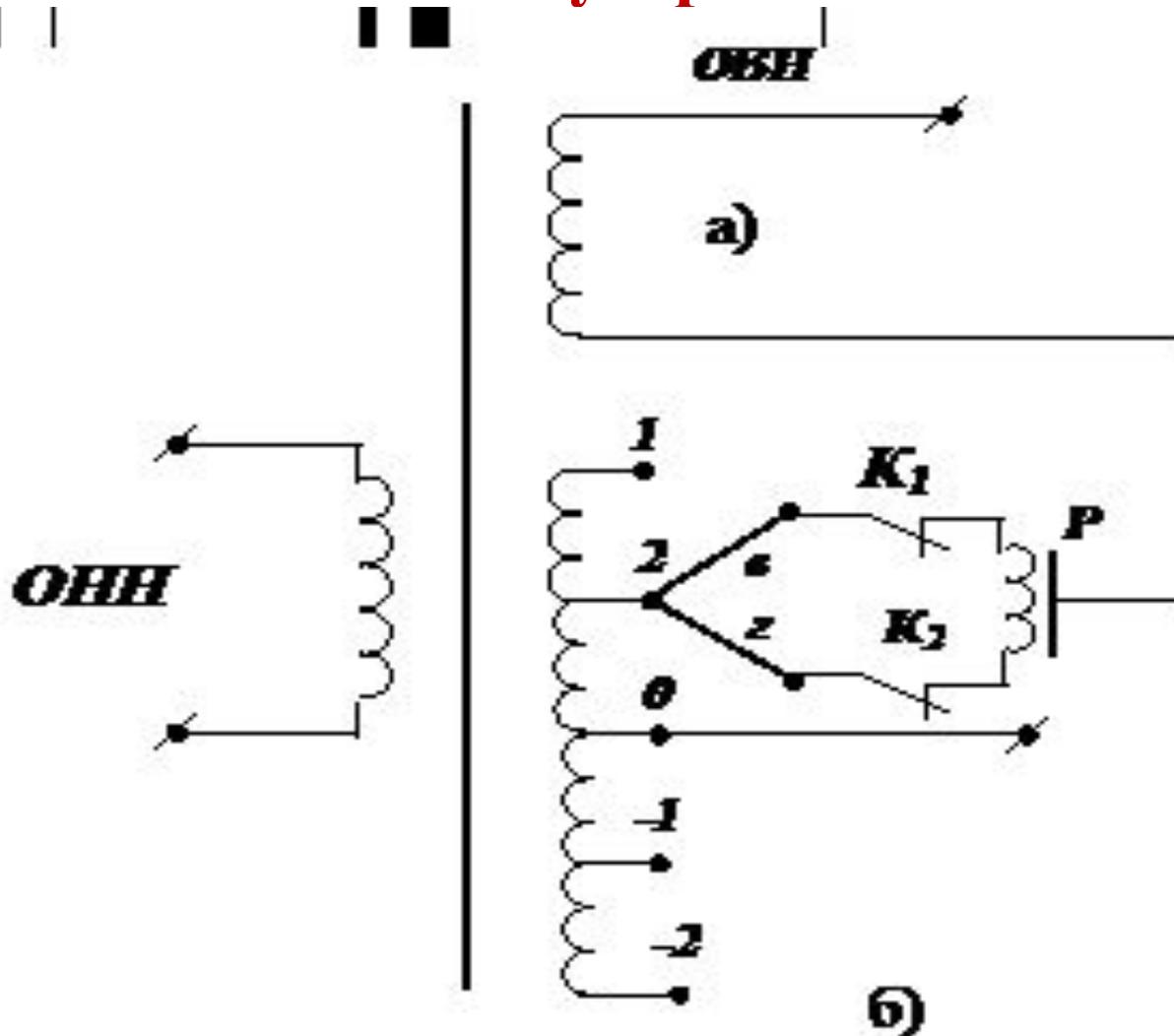


Рисунок 18.3 – Схема РПН с реактором

- На регулируемой части обмотки имеется ряд ответвлений к неподвижным контактам 1, 2, 0, -1, -2.
- Ответвления 1, 2 **включены согласно** виткам основной обмотки.
- *При включении ответвлений 1, 2 коэффициент трансформации увеличивается.*
- Ответвления -1, -2 соответствуют части витков, которые **включены встречно** по отношению к виткам основной обмотки.
- *Их включение приводит к уменьшению коэффициента трансформации.*

# Принцип работы РПН

- **Основным выводом** обмотки высшего напряжения является **нулевой вывод**. С него снимается **номинальное напряжение**.
- На регулируемой части обмотки есть переключающее устройство. Оно состоит из подвижных контактов  $\beta$  и  $\gamma$ , контакторов  $K1$  и  $K2$  и реактора  $P$ .
- **Середина обмотки реактора соединена с нерегулируемой частью обмотки высшего напряжения трансформатора.**
- **В нормальном режиме работы (без переключения)** ток нагрузки обмотки высшего напряжения протекает через реактор и распределяется поровну между половинами обмотки реактора.
- Поэтому **магнитный поток мал и потеря напряжения в реакторе тоже мала.**

- Переключения выполняются следующим образом.:
- Предположим, что необходимо переключиться с ответвления 2 на ответвление 1.
- Для этого отключается контактор  $K1$ , переводится подвижный контакт  $в$  на ответвление 1 и вновь включается контактор  $K1$ .
- В результате этих действий секция 1 - 2 оказывается замкнутой на реактор.
- Значительная ***индуктивность реактора ограничивает уравнительный ток***, который возникает из-за наличия напряжения на секции 1 – 2.
- Затем отключается контактор  $K2$ , переводится подвижный контакт  $г$  на ответвление 1 и включается контактор  $K2$ .

- При регулировании напряжения **для ограничения величины уравнительного тока переключение выполняется только на соседнее с исходным регулировочное ответвление.**
- **При необходимости переключения на несколько ответвлений процесс переключения выполняется по шагам.**
- **Трансформаторы с РПН имеют большее число ступеней регулировочных ответвлений, чем трансформаторы с ПБВ.**
- Обычно пределы регулирования коэффициента трансформации трансформаторов с РПН **составляют от  $\pm 16$  до  $\pm 20$  % от номинального.**