

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

§ 20. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА  
В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Короткие замыкания в электрических установках возникают обычно вследствие каких-либо неисправностей в сетях (при механическом повреждении изоляции, электрическом ее пробое в результате перенапряжений и т. д.) или при ошибочных действиях эксплуатационного персонала.

Для трансформатора короткое замыкание очень опасно, так как при этом возникают очень большие токи. При коротком замыкании зажимов вторичной обмотки сопротивление нагрузки  $z_n$  практически равно нулю и, следовательно, напряжение на зажимах

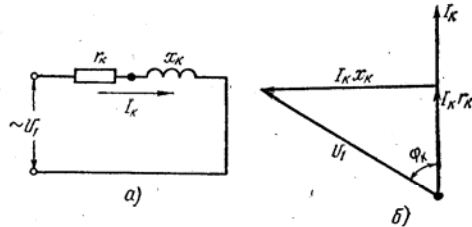


Рис. 29. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) для одной фазы трансформатора при коротком замыкании

вторичной обмотки  $U_2$  также равно нулю. Таким образом, напряжение  $U_1$ , приложенное к первичной обмотке, будет уравновешено падением напряжения в полных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток  $z_k = z_1 + z_2'$ . Эквивалентная схема для одной фазы трансформатора при коротком замыкании изображена на рис. 29, а.

Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки трансформатора при коротком замыкании вторичной обмотки запишется в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = I_k z_k, \text{ где } I_k \text{ — ток короткого замыкания.}$$

На рис. 29, б показана векторная диаграмма для одной фазы трансформатора при коротком замыкании. Вертикально вверх направлен вектор тока короткого замыкания  $I_k$ . Параллельно векто-

ру тока направлен вектор падения напряжения в активном сопротивлении короткого замыкания  $I_k r_k$ . Повернут относительно вектора тока на  $\frac{\pi}{2}$  в сторону опережения (против часовой стрелки)

вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении короткого замыкания трансформатора  $I_k x_k$ .

Геометрическая сумма векторов  $I_k r_k$  и  $I_k x_k$  определит вектор приложенного к первичной обмотке напряжения  $U_1$ , который повернут относительно вектора тока короткого замыкания  $I_k$  в сторону опережения на угол короткого замыкания  $\phi_k$ . Этот угол зависит от соотношения сопротивлений  $x_k$  и  $r_k$ . Чем больше индуктивное сопротивление  $x_k$  и чем меньше активное сопротивление  $r_k$ , тем большим будет угол  $\phi_k$ . Таким образом, сила тока короткого замыкания трансформатора  $I_k = \frac{U_k}{z_k}$ .

Так как падение напряжения в полном сопротивлении обмоток трансформатора при номинальном токе  $I_n$  составляет 5–7% от номинального напряжения, т. е.  $I_n z_k \approx (0,05 \div 0,07) U_1$ , ток короткого замыкания окажется большим номинального тока во столько раз, во сколько номинальное напряжение больше падения напряжения в полном сопротивлении обмоток при номинальном токе.

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{U_1}{I_n z_k} = \frac{U_1}{(0,05 \div 0,07) U_1} = 20 \div 14.$$

Отношение  $\frac{I_k}{I_n} = \frac{100}{u_k}$  называется *кратностью тока короткого замыкания*, где  $u_k$  — напряжение короткого замыкания.

Следовательно, ток короткого замыкания трансформатора во много раз больше номинального тока:  $I_k = (14 \div 20) I_n$ . Здесь мы имели в виду установившееся значение тока короткого замыкания трансформатора. Такой ток, во много раз больший номинального, будет протекать в обмотках трансформатора в течение всего времени короткого замыкания, как бы велико оно ни было. Однако в момент короткого замыкания кратность тока короткого замыкания может оказаться еще большей. В зависимости от мгновенного значения приложенного напряжения мгновенный ток короткого замыкания  $I_k'$  отличается от установившегося  $I_k$  в 1–2 раза.

Если короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора произошло в момент, когда мгновенное значение напряжения  $u_1$  равно максимальному значению  $U_{1m}$ , то мгновенный ток короткого замыкания  $I_k'$  равен установившемуся значению  $I_k$ . При коротком замыкании в момент, когда напряжение  $u_1$  равно нулю, мгновенный ток короткого замыкания окажется в 2 раза большим установившегося тока.

Ток короткого замыкания резко повышает температуру обмотки, что угрожает целостности изоляции. Потери в проводах обмоток трансформатора пропорциональны току во второй степени ( $P_m = I^2 r_k$ ). Поэтому в случае, когда ток короткого замыкания окажется, например, в 20 раз большим номинального тока, потери в про-

водах обмоток будут в 400 раз большими, чем при номинальном токе (если не учитывать увеличения сопротивления обмоток от нагрева). Выделение большой мощности в проводах обмоток вызывает резкое повышение их температуры, вследствие которого возможно нарушение целостности изоляции и выход трансформатора из строя.

Поэтому все трансформаторы снабжаются достаточно быстродействующей защитой, которая отключает трансформатор в случае его короткого замыкания. Если время, в течение которого трансформатор находится в режиме короткого замыкания, будет мало, обмотки его не успеют нагреться до температуры, опасной для их изоляции.

Короткое замыкание трансформатора очень опасно, так как может привести к его разрушению. Как известно, между проводом,

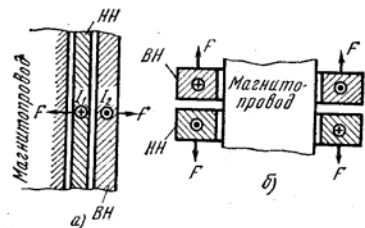


Рис. 30. Направление сил, действующих на концентрические симметричные (а) и дисковые (б) обмотки трансформатора

(первичной или вторичной) протекают токи одинакового направления, так что все витки одной обмотки взаимно притягиваются. Намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток имеют встречное направление, поэтому обмотки стремятся оттолкнуться одна от другой.

Механические силы, действующие на обмотки, зависят от конструкции обмоток, размещения витков и токов, протекающих в обмотках. В концентрических симметричных обмотках силы  $F$ , действующие на обмотки, направлены перпендикулярно оси катушек (рис. 30, а); в дисковых чередующихся обмотках силы направлены параллельно оси катушек (рис. 30, б).

Так как силы, действующие на провода с током, зависят от произведения токов, то и силы  $F$ , действующие на обмотки трансформаторов при коротком замыкании, будут во много раз больше сил, которые возникают при номинальной нагрузке. Под действием очень больших механических сил обмотки трансформатора деформируются настолько, что может быть нарушена изоляция и резко уменьшена их электрическая прочность.

Конструкция обмоток должна быть рассчитана на такую меха-

ническую прочность, которая противостояла бы силам, возникающим в первый момент от мгновенных токов короткого замыкания  $I'_k$ , превышающих установившиеся токи короткого замыкания  $I_k$  примерно в два раза.

**Пример.** Трансформатор имеет напряжение короткого замыкания  $u_k=5,5\%$  и номинальный ток  $I_n=120$  а. Определить наибольший возможный мгновенный ток короткого замыкания.

**Решение.** Считая приложенное напряжение  $U_1$  номинальным, полагаем его равным 100%.

Установившийся ток короткого замыкания

$$I_k = I_n \frac{U_1}{u_k} = 120 \cdot \frac{100}{5,5} = 2180 \text{ а.}$$

Наибольший мгновенный ток короткого замыкания

$$I'_k = 2I_k = 4360 \text{ а.}$$

## § 21. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Опыт короткого замыкания производится при значительно пониженном напряжении и является вторым предельным режимом работы трансформатора, который наряду с опытом холостого хода позволяет определить параметры трансформатора при любой нагрузке.

При опыте короткого замыкания вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение  $U_k$ , при котором в обмотках трансформатора протекают номинальные токи. Это напряжение называется *напряжением короткого замыкания* и измеряется в процентах от номинального, т. е.

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100.$$

Согласно ГОСТ 11677—65 напряжение короткого замыкания  $u_k \% = 5,5 \div 10,5$ . При столь малом напряжении магнитный поток незначителен, а следовательно, мал и намагничивающий ток, т. е.  $I_{ок.з} = 0$ . Поэтому можно считать, что намагничивающая сила первичной обмотки трансформатора идет лишь на компенсацию н. с. вторичной обмотки. Пренебрегая намагничивающим током при опыте короткого замыкания, можно записать равенство:  $I_1 = -I_2'$ , т. е. ток первичной обмотки равен приведенному току вторичной обмотки с обратным знаком.

При опыте короткого замыкания по обмоткам трансформатора протекают номинальные токи и приложенное напряжение к первичной обмотке, как это видно из эквивалентной схемы (см. рис. 29, а), равно:

$$\dot{U}_k = I_n z_k = \dot{U}_a + \dot{U}_x, \quad U_a = I_n r_k, \quad U_x = I_n x_k,$$

где  $I_n$  — номинальный ток первичной обмотки;  $z_k$ ,  $r_k$ ,  $x_k$  — соответственно полное, активное и реактивное сопротивления короткого



замыкания;  $U_a$  и  $U_x$  — соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания ( $U_k = \sqrt{U_a^2 + U_x^2}$ ).

При опыте короткого замыкания трансформатора для понижения напряжения используют индукционный регулятор, трансформатор и т. д. В цепь первичной обмотки включают амперметр  $A$ , вольтметр  $V$  и ваттметр  $W$  (рис. 31). Для большей точности измерения первичной обмоткой является обмотка ВН. Напряжение короткого замыкания составляет всего несколько процентов от номинального, поэтому для обмотки ВН оно будет иметь большую величину и может быть измерено с большей точностью, чем для обмотки НН. Также для большей точности измерения вторичную

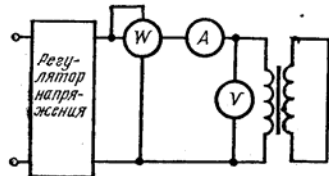


Рис. 31. Схема опыта короткого замыкания однофазного трансформатора

обмотку замыкают накоротко шиной с малым сопротивлением. Включение амперметров и других каких-либо приборов в цепь вторичной обмотки недопустимо, так как это снижает точность измерений.

Опыт короткого замыкания позволяет определить напряжение короткого замыкания  $U_k$ , потери в обмотках трансформатора  $P_m$  и сопротивления короткого замыкания трансформатора  $z_k$ ,  $r_k$  и  $x_k$ .

Напряжение короткого замыкания определится показанием вольтметра при номинальном токе трансформатора.

Потери в обмотках  $P_m$  определяются показанием ваттметра. При опыте короткого замыкания полезная мощность трансформатора равна нулю, а потери в стали ничтожно малы, так как мал магнитный поток в магнитопроводе. Поэтому мощность  $P_k$ , потребляемая трансформатором при опыте короткого замыкания, расходуется на нагревание проводов обмоток (на потери в меди  $P_m$ ), т. е.  $P_k = P_m = I_n^2 r_k$ , где  $I_n$  — номинальный ток первичной обмотки.

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{I_n^2},$$

полное сопротивление

$$z_k = \frac{U_k}{I_n},$$

индуктивное сопротивление

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Если опыт короткого замыкания производят при «холодном» (неработающем) трансформаторе, то параметры короткого замыкания приводят к рабочей температуре  $75^\circ\text{C}$ . При изменении температуры меняется активное сопротивление и потери в обмотках.

Приведенные к температуре  $75^\circ\text{C}$  активное сопротивление и мощность потерь в обмотках равны:

$$r_{k75} = r_k \frac{75+235}{T+235} \quad \text{и} \quad P_{k75} = P_k \frac{75+235}{T+235},$$

где  $T$  — температура обмотки при опыте короткого замыкания.

Так как реактивное сопротивление обмоток  $x_k$  не зависит от температуры, полное сопротивление при температуре  $75^\circ\text{C}$

$$z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}.$$

Напряжение короткого замыкания, его активная и реактивная составляющая в процентах при температуре  $75^\circ\text{C}$  равны:

$$u_{k75} \% = \frac{I_n z_{k75}}{U_{1н}} \cdot 100;$$

$$u_{a75} \% = \frac{I_n r_{k75}}{U_{1н}} \cdot 100;$$

$$u_x \% = \frac{I_n x_k}{U_{1н}} \cdot 100.$$

При испытании трехфазного трансформатора во все выражения подставляют фазные значения токов, напряжений и мощности для одной фазы.

Соотношение активных и реактивных сопротивлений и составляющих напряжения короткого замыкания зависит от номинальной мощности трансформатора. У трансформаторов малой мощности (до нескольких киловольт-ампер) активное сопротивление  $r_k$  больше реактивного  $x_k$  и активная составляющая напряжения короткого замыкания  $u_a$  больше реактивной составляющей  $u_x$ . Для трансформаторов больших мощностей (сотни и тысячи киловольт-ампер) соотношение обратное, т. е.  $r_k < x_k$  и  $u_a < u_x$ .

С увеличением номинальной мощности увеличиваются сечения проводов обмоток, так как увеличиваются номинальные токи. Поэтому активное сопротивление, обратно пропорциональное сечению проводов, уменьшается и активная составляющая напряжения короткого замыкания также уменьшается.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания увеличивается с увеличением мощности трансформатора. Это объясняется тем, что реактивное сопротивление обмоток трансформатора обусловлено потоками рассеяния, магнитные линии которых замыкаются по немагнитной среде и сцеплены с проводами той обмотки, токами которой они создаются. Чем больше номинальная мощность трансформатора, тем больше сечение проводов обмоток и объем, занимаемый обмотками. Поэтому увеличиваются как потоки рассеяния, так и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания зависит также от рабочих напряжений обмоток, увеличиваясь с увеличением напряжения. Так, для трансформаторов с номиналь-

ной мощностью 180 кВА при напряжении первичной и вторичной обмоток 35 и 3,15 кВ реактивная составляющая напряжения короткого замыкания  $u_x = 3,8\%$ , а при напряжении обмоток 35 и 10,5 кВ  $u_x = 6\%$ . У трансформатора с номинальной мощностью 20 000 кВА при напряжении обмоток 38,5 и 11 кВ  $u_x = 7,9\%$ , а при напряжении обмоток 121 и 38,5 кВ  $u_x = 10,4\%$ .

При увеличении рабочих напряжений обмоток трансформатора увеличиваются изоляционные промежутки, что увеличивает как потоки рассеяния, так и реактивные сопротивления обмоток.

## § 22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ДАННЫМ ОПЫТОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Свойства трансформатора при работе под нагрузкой могут быть определены непосредственным его испытанием. Если включить трансформатор на какую-либо нагрузку и изменять ее, то по показаниям приборов можно судить, каким образом будет изменяться напряжение на зажимах вторичной обмотки и к. п. д. трансформатора. Однако такое определение рабочих свойств трансформатора имеет недостатки. При испытании трансформатора под нагрузкой расходуется очень много электроэнергии; тем больше, чем больше мощность трансформатора. Для создания активной, индуктивной и емкостной нагрузки необходимо очень громоздкое оборудование (реостаты, индуктивные катушки и конденсаторы). Кроме того, при непосредственном испытании трансформатора получаются неточные результаты.

Все рабочие свойства трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. На производство опытов холостого хода и короткого замыкания тратится сравнительно мало энергии; при этом отпадает надобность в громоздком нагрузочном оборудовании и результаты получаются очень точные.

При опыте холостого хода измеряют напряжение первичной и вторичной обмоток  $U_1$  и  $U_2$ , ток холостого хода  $I_0$  и потребляемую при холостом ходе мощность  $P_0$ . По данным опыта холостого хода определяют коэффициент трансформации  $k$ ; потери в стали  $P_{ст}$ ; полное, активное и реактивное сопротивления трансформатора при холостом ходе.

По данным опыта короткого замыкания определяют потери в обмотках  $P_{кн}$  при номинальном токе, полное  $z_k$ , активное  $r_k$  и реактивное  $x_k$  сопротивления трансформатора при коротком замыкании, а также напряжение короткого замыкания  $u_k$ , активную  $u_a$  и реактивную  $u_x$  составляющие напряжения короткого замыкания.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора изменяется в зависимости от его нагрузки. Это происходит вследствие падения напряжения в сопротивлениях обмоток от нагрузочного тока. Процентное понижение вторичного напряжения при любой нагрузке

$$\Delta u \% = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2), \text{ где } \beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$$

Напряжение вторичной обмотки при нагрузке

$$U_2 = U_{2-0} \left( 1 - \frac{\Delta u}{100} \right) \text{ в, где } U_{2-0} \text{ — напряжение при холостом ходе,}$$

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания можно определить к. п. д. трансформатора при любой нагрузке:

$$\eta = \frac{\beta P_n \cos \varphi_2}{\beta P_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta P_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}$$

**Пример.** Пусть при испытании трехфазного трансформатора номинальной мощности  $P_n = 75$  кВА, обмотка ВН которого соединена в звезду, а обмотка НН — в треугольник, при холостом ходе получили следующие данные:  $U_1 = 10$  кВ,  $U_2 = 400$  в,  $I_0 = 0,325$  а,  $P_0 = 590$  вт. При опыте короткого замыкания (опыт производился при работающем трансформаторе) получили следующие данные:  $U_k = 550$  в,  $I_k = 4,35$  а,  $P_k = 1875$  вт.

Определить параметры трансформатора, напряжение вторичной обмотки и его к. п. д. при нагрузке, равной  $0,25 P_n$ ,  $0,5 P_n$ ,  $0,75 P_n$  и  $P_n$ ;  $\cos \varphi = 1$  и  $0,8$  (индуктивный характер нагрузки).

**Решение.** По данным опыта холостого хода находим:

$$k = \frac{U_1}{\sqrt{3} U_2} = \frac{10\,000}{1,73 \cdot 400} = 14,5;$$

$$P_{ст} = \frac{P_0}{3} = \frac{590}{3} = 197 \text{ вт};$$

$$z_0 = \frac{U_1}{\sqrt{3} I_0} = \frac{10\,000}{1,73 \cdot 0,325} = 17\,800 \text{ ом};$$

$$r_0 = \frac{P_{ст}}{I_0^2} = \frac{197}{0,106} = 1860 \text{ ом};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{17\,800^2 - 1860^2} = 17\,700 \text{ ом.}$$

По данным опыта короткого замыкания находим:

$$P_{кн} = \frac{P_k}{3} = 625 \text{ вт};$$

$$z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_k} = \frac{550}{\sqrt{3} \cdot 4,35} = 73,5 \text{ ом};$$

$$r_k = \frac{P_{кн}}{I_k^2} = \frac{625}{4,35^2} = 32,8 \text{ ом};$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{73,5^2 - 32,8^2} = 65,8 \text{ ом};$$

$$u_k \% = \frac{I_k z_k}{U_n} \cdot 100 = \frac{4,35 \cdot 73,5}{5760} \cdot 100 = 5,5\%;$$

$$u_a \% = \frac{I_k r_k}{U_n} \cdot 100 = \frac{4,35 \cdot 32,8}{5760} \cdot 100 = 2,6\%;$$

$$u_x \% = \frac{I_{нхк}}{U_n} \cdot 100 = \frac{4,35 \cdot 65,8}{5760} \cdot 100 = 4,9\%.$$

Так как по условию опыт короткого замыкания производился при рабочей температуре обмоток, сопротивления не пересчитываем.

Процентное понижение вторичного напряжения:  
При  $\cos \varphi_n = 1$ :

$$\Delta u \% = \beta u_a = \beta \cdot 2,6\%.$$

При  $\cos \varphi_n = 0,8$  (индуктивный характер нагрузки):

$$\Delta u \% = \beta (u_a \cos \varphi_n + u_x \sin \varphi_n) = \beta (2,6 \cdot 0,8 + 4,9 \cdot 0,6) = \beta \cdot 5\%.$$

Вторичное напряжение при холостом ходе  $U_{2-0} = 400$  в, а при нагрузке

$$U_2 = U_{2-0} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right).$$

Вторичное напряжение:  
При  $\cos \varphi_n = 1$ :

$$\text{для } \beta = 0,25 \quad U_2 = 397,3 \text{ в; для } \beta = 0,5 \quad U_2 = 394,6 \text{ в;}$$

$$\text{для } \beta = 0,75 \quad U_2 = 391,9 \text{ в; для } \beta = 1 \quad U_2 = 389,2 \text{ в.}$$

При  $\cos \varphi_n = 0,8$ :

$$\text{для } \beta = 0,25 \quad U_2 = 395 \text{ в; для } \beta = 0,5 \quad U_2 = 390 \text{ в;}$$

$$\text{для } \beta = 0,75 \quad U_2 = 385 \text{ в; для } \beta = 1 \quad U_2 = 380 \text{ в.}$$

К. п. д. трансформатора:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta P_n \cos \varphi_n + P_0 + \beta^2 P_{кн}}.$$

При  $\cos \varphi_n = 1$ :

$$\eta = 1 - \frac{590 + \beta^2 \cdot 1875}{\beta \cdot 75 \cdot 10^3 + 590 + \beta^2 \cdot 1875};$$

для  $\beta = 0,25$   $\eta = 0,964$ ; для  $\beta = 0,5$   $\eta = 0,972$ ; для  $\beta = 0,75$   $\eta = 0,97$ ; для  $\beta = 1$   $\eta = 0,968$ .

При  $\cos \varphi_n = 0,8$ :

$$\eta = 1 - \frac{590 \cdot \beta^2 \cdot 1875}{\beta \cdot 60 \cdot 10^3 + 590 + \beta^2 \cdot 1875};$$

$$\text{для } \beta = 0,25 \quad \eta = 0,954; \text{ для } \beta = 0,5 \quad \eta = 0,965;$$

$$\text{для } \beta = 0,75 \quad \eta = 0,965; \text{ для } \beta = 1 \quad \eta = 0,96.$$

Наибольшее значение к. п. д. трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотках. Для рассмотренного трансформатора коэффициент нагрузки, соответствующий наибольшему к. п. д., равен

$$\sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{590}{1875}} = 0,56.$$

Значение к. п. д. при  $\beta = 0,56$  мало отличается от значения его при  $\beta = 0,5$  и поэтому его определение здесь не приводится.

Таким же образом параметры трансформатора и его рабочие свойства могут быть определены по данным, обусловленным соответствующими стандартами и приведенным на щитке трансформатора.

#### Контрольные вопросы

1. По каким причинам возможно короткое замыкание трансформатора?
2. Что называется напряжением короткого замыкания трансформатора?
3. Каким образом производится опыт короткого замыкания трансформатора?
4. Как определяют напряжение вторичной обмотки и к. п. д. трансформатора при любой нагрузке по данным опытов холостого хода и короткого замыкания?