

Э. А. ТИЙГИМЯГИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА  
ТОКОВ ОБРАТНОГО ЗАЖИГАНИЯ В СЛОЖНЫХ ОДНО —  
И МНОГОМОСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМАХ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1958



Ep. 6.7

Э. А. ТИЙГИМЯГИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА  
ТОКОВ ОБРАТНОГО ЗАЖИГАНИЯ В СЛОЖНЫХ ОДНО —  
И МНОГОМОСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМАХ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1958

7.0.43

ТАШКЕНТСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ТИПЫ ТАШКЕНТСКОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ЦЕНТРА  
1958

И. А. ТАШКЕНТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАБОТА МЕТОДИКА РАБОТА  
ТОРОЙ ОБРАТНОГО ВАЖИТАРИИ В ГОДНЫХ ОДИО  
И МОТОРНЫХ ВЫПРЯМЛЕННЫХ ОДЕМА

Ep. 2306

~~P 37 830~~



## ВВЕДЕНИЕ

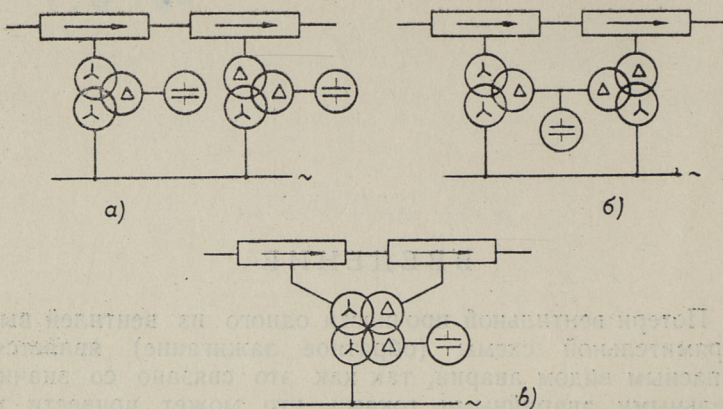
Потери вентильной прочности одного из вентилях выпрямительной схемы (обратное зажигание) является опасным видом аварии, так как это связано со значительными аварийными токами, что может привести к весьма серьезным последствиям.

Для выпрямительных трансформаторов особенно опасным при обратном зажигании является наличие нескомпенсированных магнитодвижущих сил, вызывающих значительные электродинамические усилия, могущие привести в разрушению обмоток трансформатора, если не приняты меры по обеспечению повышенной их прочности [Л-1].

Как известно [Л-2], ни параллельное, ни последовательное соединение мостов в многомостовых выпрямительных установках не приводит к увеличению токов обратного зажигания по сравнению с простой одномостовой схемой. Значительное увеличение токов обратного зажигания по сравнению с простой трехфазной мостовой схемой может иметь место в сложных мостовых выпрямительных схемах с многообмоточными трансформаторами при наличии на выпрямительной подстанции синхронных генераторов или синхронных компенсаторов. Применение синхронных компенсаторов на выпрямительной подстанции может иметь место при реверсивных передачах постоянного тока.

Три возможных варианта подключения синхронных компенсаторов к многомостовой выпрямительной схеме приведены на фиг. 1, где для простоты показаны только два моста.

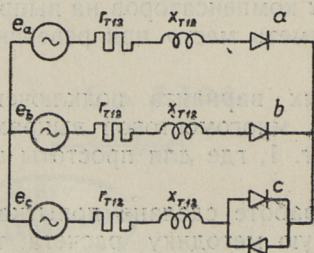
В настоящей работе сделана попытка дать общую и достаточно простую методику расчета токов обратного зажигания в сложных одно- и многомостовых выпрямительных схемах с синхронными компенсаторами.



Фиг. 1 — Схемы двухмостовых преобразователей с синхронными компенсаторами.

### Общие закономерности и схемы замещения

Основные закономерности протекания электромагнитных процессов при обратных зажиганиях в простой трехфазной мостовой выпрямительной схеме были выявлены А. М. Утевским [Л-2]. Учитывая, что максимальные амплитудные значения аварийных токов и максимальные электродинамические усилия в выпрямительных трансформаторах имеют место в установившемся режиме, который наступает через 0,05—0,15 сек после момента возникновения обратного зажигания, рассматривался только установившийся режим. Пренебрежение выпрямленным током по сравнению с аварийными токами, протекающими в обмотках трансформатора и в аварийной группе вентилей, позволило применить простую схему замещения (фиг. 2), где  $X_{T12}$  и  $r_{T12}$  — параметры



Фиг. 2 — Схема замещения для исследования обратного зажигания в простой одномостовой выпрямительной схеме.

выпрямительного трансформатора, определяемые из опыта короткого замыкания.

Рассмотрение сложных многомостовых выпрямительных схем с синхронными машинами требует значительной идеализации, так как учет влияния некоторых второстепенных факторов сделал бы исследование исключительно трудным.

При обратном зажигании в одном из вентилях многомостовой выпрямительной схемы аварийные токи возникают также только в вентилях одной половины аварийного моста. Здесь также возможно пренебрежение выпрямленным током по сравнению с аварийными токами, что значительно упрощает задачу, так как исследование схемы с большим количеством вентилях сводится к исследованию схемы только с тремя вентилями.

В начале переходного процесса обратного зажигания в мощных выпрямительных установках, когда еще сохраняется равновесие магнитодвижущих сил в трансформаторе, можно пренебречь намагничивающим током. При установившемся режиме обратного зажигания наличие постоянного подмагничивания трансформатора вызывает значительное увеличение подмагничивающего тока.

Трудности получения схем замещения трансформаторов с ветвью намагничивания при постоянном подмагничивании заставляют и при исследовании установившегося режима обратного зажигания пренебречь намагничивающим током. Пренебрежение намагничивающим током хотя и вызывает некоторую неточность в аналитическом исследовании, всё-же является приемлемым, так как дает, — как показали эксперименты, — некоторое повышение тока в обратно-горящем вентиле.

Пренебрежение намагничивающим током позволяет применять простые схемы замещения трансформаторов. Правомочность применения (при пренебрежении намагничивающим током) простой трехлучевой схемы замещения трехобмоточного трансформатора, независимо от группы соединения, при исследовании мостовой преобразовательной схемы с компенсирующим устройством, как было показано в отчете ЭНИН'а [Л-3], вытекает из методики исследования электромагнитных процессов в преобразовательных установках [Л-4].

Как следует из работы А. Ф. Крogerиса [Л-5] и из

отчета НИИПТ'а за 1954—55 гг.\*), при исследовании электромагнитных процессов при нормальных режимах в преобразовательных установках можно с достаточной точностью применять для синхронных машин и системы переменного тока идеальную схему замещения со сверхпереходной ЭДС.

Такую идеальную схему замещения, полученную для предшествующего обратному зажиганию нормального режима, можно с достаточной точностью применять и для исследования электромагнитных процессов, имеющих место непосредственно после возникновения обратного зажигания, до момента, когда обратное зажигание после первого всплеска аварийных токов либо само собою устранивается, либо ликвидируется при помощи быстродействующей сеточной защиты. Это объясняется тем, что за такой короткий промежуток времени (10—15 мсек) происходит незначительное изменение магнитного состояния синхронных машин.

В случае отсутствия или отказа быстродействующей сеточной защиты, когда обратное зажигание имеет затяжной характер, представляет интерес наиболее тяжелый режим, являющийся определяющим для выяснения предельных условий работы вентилялей и для проектирования силовых трансформаторов выпрямительных установок.

Как показано в отчете ЭНИН'а [Л—6], исследование наиболее тяжелого режима обратного зажигания, который может наступить раньше чем 0,05—0,15 сек после момента возникновения обратного зажигания, может быть заменено исследованием установившегося режима обратного зажигания одного из вентилялей при сверхпереходных параметрах и сверхпереходных ЭДС синхронных машин и питающей системы переменного тока. Такое допущение дает завышенные значения токов обратного зажигания (в реальных схемах без быстродействующего АРН ошибка порядка 10%; при наличии быстродействующего АРН на синхронных генераторах и синхронных компенсаторах ошибка уменьшается).

Для упрощения расчетов установившегося режима обратного зажигания считаем ЭДС отдельных источников

---

\* ) Квятковский В. М. — Исследование совместной работы инвертора с простейшей приемной энергосистемой. Отчет НИИПТ'а за 1954—55 гг.



совпадающими по фазе, как это делают при упрощенном расчете токов короткого замыкания [Л-7].

В случае подключения к выпрямительным трансформаторам синхронных генераторов возможно выпадение из синхронизма генератора, подключенного к трансформатору аварийного моста. Самым опасным с точки зрения токов обратного зажигания в вентилях и схемной обмотке трансформатора является повидимому момент совпадения по фазе ЭДС генератора, выпавшего из синхронизма, и ЭДС остальных источников. Поэтому и в таком случае расчет самого опасного режима обратного зажигания может быть приближенно заменен расчетом установившегося режима при совпадении по фазе ЭДС всех источников питания.

### **Приведение сложных схем замещения к простейшему виду**

Исследование электромагнитных процессов при переходном и установившемся режимах обратного зажигания в сложных многомостовых выпрямительных схемах путем решения дифференциальных уравнений, написанных по всем независимым контурам схем замещения, и определение постоянных интегрирования из граничных условий является весьма громоздким и связано с большими математическими трудностями.

Для исследования установившегося режима обратного зажигания может быть применен более простой путь — приведение сложных схем замещения к простейшему виду.

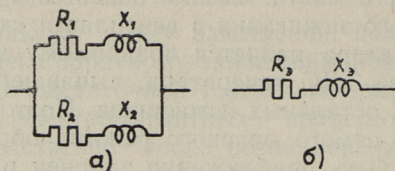
Как известно, при исследовании линейных цепей синусоидального тока иногда целесообразно применять для упрощения расчетов метод приведения схем к более простому виду. В случае несинусоидальных ЭДС и токов приведение должно быть проведено отдельно для каждой гармоники. В случае возникновения несинусоидальных токов из-за нелинейности некоторых элементов схемы метод приведения в общем случае неприменим, так как не известны спектры гармоник.

Покажем, что в некоторых случаях при исследовании цепей несинусоидального тока с достаточной точностью могут быть применены обычные способы преобразования относительно основной гармоники.

Основными элементами преобразования являются последовательное и параллельное сложение ветвей, переход

от соединения треугольником к соединению трехлучевой звездой и обратно.

Последовательное сложение ветвей при несинусоидальном токе не вызывает ошибки. Иначе обстоит дело при параллельном сложении ветвей.



Фиг. 3 — Параллельное сложение двух ветвей.

Рассмотрим параллельное сложение двух ветвей, состоящих из активных и индуктивных сопротивлений (фиг. 3). При этом индексом «п» обозначаем параметры, относящиеся к «п»-ой гармонике; параметры без индекса «п» относятся к основной гармонике. Цифровые индексы указывают, к какой ветви относится данный параметр. Индексом «э» обозначены параметры эквивалентной ветви.

Импедансы ветвей для «п»-ой гармоники.

$$Z_{1n} = R_1 + jnX_1$$

$$Z_{2n} = R_2 + jnX_2$$

(активное сопротивление считаем независимым от частоты) и эквивалентный импеданс для «п»-ой гармоники

$$Z_{эн} = \frac{Z_{1n} \cdot Z_{2n}}{Z_{1n} + Z_{2n}}$$

или

$$Z_{эн} = R_{эн} + jX_{эн},$$

где

$$R_{эн} = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) + n^2 (R_1 X_2^2 + R_2 X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + n^2 (X_1 + X_2)^2}$$

$$X_{эн} = n \frac{(X_1 R_2^2 + X_2 R_1^2) + n^2 X_1 X_2 (X_1 + X_2)}{(R_1 + R_2)^2 + n^2 (X_1 + X_2)^2}$$

Эквивалентный импеданс для основной гармоники

$$Z_3 = R_3 + jX_3,$$

где

$$R_3 = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) + (R_1 X_2^2 + R_2 X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

$$X_3 = \frac{(X_1 R_2^2 + X_2 R_1^2) + X_1 X_2 (X_1 + X_2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}.$$

Относительные ошибки эквивалентного активного и индуктивного сопротивлений для «п»-ой гармоники в случае проведения преобразования относительно основной гармоники будут:

$$\delta_{Rn} = \frac{R_{3n} - R_3}{R_3} = \frac{k_1^2 (1 + kq)^2 + (1 + q)^2}{kk_1^2 (1 + kq) + (k + q)}$$

$$\cdot \frac{kk_1^2 (1 + kq) + n^2 (k + q)}{k_1^2 (1 + kq)^2 + n^2 (1 + q)^2} - 1 \quad (1)$$

$$\delta_{Xn} = \frac{X_{3n} - nX_3}{nX_3} = \frac{k_1^2 (1 + kq)^2 + (1 + q)^2}{k_1^2 (1 + k^2q) + (1 + q)}$$

$$\cdot \frac{k_1^2 (1 + k^2q) + n^2 (1 + q)}{k_1^2 (1 + kq)^2 + n^2 (1 + q)^2} - 1, \quad (2)$$

где

$$q = \frac{X_2}{X_1}; k_1 = \frac{R_1}{X_1}; k = \frac{k_2}{k_1}; k_2 = \frac{R_2}{X_2}.$$

Если выбрать индексы сопротивлений таким образом, чтобы

$$\frac{R_1}{X_1} \geq \frac{R_2}{X_2}$$

то величины, входящие в выражения (1) и (2) могут изменяться в следующих пределах:

$$1 \leq n \leq \infty; 0 \leq q \leq \infty; 0 \leq k_1 \leq \infty; 0 \leq k \geq 1.$$

Нетрудно показать, что всегда  $\delta_{Rn} \geq 0$  и  $\delta_{Xn} \leq 0$ .

Аналитическое исследование зависимостей  $\delta_{Rn}$  и  $\delta_{Xn}$  от порядка гармоники «п» показывает, что абсолютные ве-

личины относительных ошибок имеют верхний предел при  $n \rightarrow \infty$ . Пределы относительных ошибок будут:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_{Xn} = - \frac{k_i^2 q (1 - k)^2}{(1 + q) [k_i^2 (1 + k^2 q) + (1 + q)]}$$

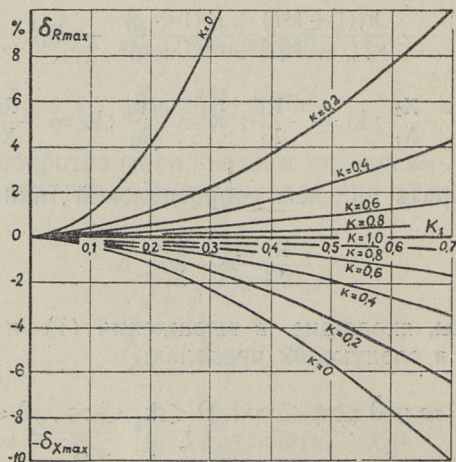
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_{Rn} = \frac{k_i^2 q (1 - k)^2 (1 + kq)}{(1 + q)^2 [k_i^2 k (1 + kq) + (k + q)]}$$

Аналитическое исследование зависимостей  $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_{Xn}$  и  $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_{Rn}$  от  $q$  показывает, что  $-\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_{Xn}$  имеет максимум при

$$q = \sqrt{\frac{1 + k_i^2}{1 + k_i^2 k^2}},$$

а максимум  $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_{Rn}$  соответствует положительному корню уравнения четвертой степени

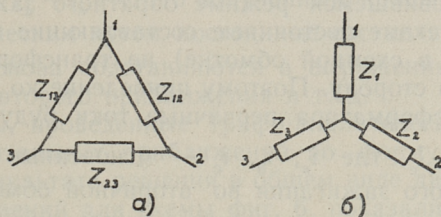
$$k_1 (1 + k_i^2 k^2) q^4 + 2(1 + k_i^2 k^2) q^2 + (1 - k^2) (2 + k_i^2 k) q^2 - 2k^2 (1 + k_i^2) q - k(1 + k) = 0$$



Фиг. 4 — Зависимость максимальных ошибок  $\delta_{Rmax}$  и  $\delta_{Xmax}$  от  $k_1$  и  $k$ .

Зависимость максимальных ошибок  $\delta_{X \max}$  и  $\delta_{R \max}$ , соответствующих этим величинам  $q$ , от  $k_1$  и  $k$  приведена на фиг. 4. Полученные кривые показывают, что чем больше  $k_1$  и чем меньше  $k$ , тем больше ошибка для эквивалентного индуктивного и активного сопротивлений.

Таким образом, при преобразовании параллельных ветвей в цепях, где индуктивные сопротивления значительно превышают активные, ошибки незначительны. С другой стороны ошибки тем меньше, чем ближе значения постоянных времени параллельных ветвей, так как отношение постоянных времени  $\frac{T_1}{T_2} = k$ .



Фиг. 5 — Преобразование соединения треугольником в соединении трехлучевой звездой.

То же самое относится к преобразованию соединения треугольником в соединении трехлучевой звездой и обратно, так как параллельное сложение двух ветвей можно считать элементом такого преобразования. Например, импеданс  $Z_1 + Z_2$  (фиг. 5, б) является результатом параллельного сложения двух импедансов  $Z_{12}$  и  $Z_{23} + Z_{13}$  (фиг. 5, а) по формуле

$$Z_1 + Z_2 = \frac{Z_{12}(Z_{23} + Z_{13})}{Z_{12} + (Z_{23} + Z_{13})}.$$

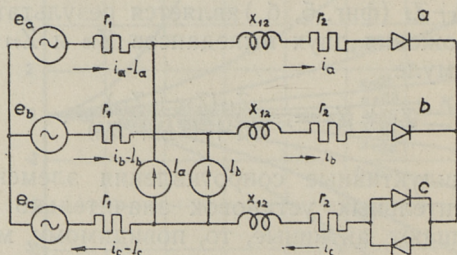
Так как индуктивные сопротивления элементов мощных выпрямительных установок значительно (в 10—20 раз) превышают активные, то, повидимому, можно для исследования установившегося режима обратного зажигания в сложной схеме с достаточной точностью применять обычные способы преобразования для приведения линейной части схемы замещения к простейшему виду (фиг. 2).

Допустимость приведения сложных схем замещения

к простейшему виду свидетельствует о том, что общий характер токов обратного зажигания в сложных много-мостовых выпрямительных схемах остается таким же, как и при обратном зажигании в простой одномостовой схеме, то-есть каждый период может быть разделен на четыре интервала; в зависимости от соотношения параметров схемы и питающей системы переменного тока может иметь место прерывистый или непрерывный ток в обрат-но горящем вентиле и т. д.

### Установившийся режим обратного зажигания в простейшей схеме

При установившемся режиме обратного зажигания в простейшей схеме постоянные составляющие вторичных токов (токов в схемной обмотке) не трансформируются на первичную сторону. Поэтому приведение ко вторичной стороне трансформатора первичные токи будут  $i_a - I_a$ ;  $i_b - I_b$  и  $i_c - I_c$ , где  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  — мгновенные значения токов обратного зажигания во вторичной обмотке, а  $I_a$ ,  $I_b$  и  $I_c$  — соответствующие постоянные составляющие. Соответствующая схема замещения изображена на фиг. 6, где  $I_a$  и  $I_b$  — источники постоянного тока,  $r_1$  — первичное активное сопротивление (или эквивалентное ему сопротивление),  $r_2$  — активное сопротивление на вторичной стороне выпрямительного трансформатора и  $x_{12}$  — суммарный или эквивалентный реактанс.



Фиг. 6 — Схема замещения для исследования установившегося режима обратного зажигания.

Для определения четырех независимых неизвестных  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $I_a$  и  $I_b$  можно составить уравнения по двум независи-

мым контурам. Дополнительными условиями являются условия переменности первичных токов  $i_a - I_a$  и  $i_b - I_b$ .

Аналитическое выражение условий переменности первичных токов приводит к весьма громоздким выражениям ввиду сложности формы кривых токов.

В качестве более простого решения может быть применен графо-аналитический способ последовательных приближений, состоящий в следующем. Вначале решается задача в общем виде; при этом постоянные составляющие тока  $I_a$  и  $I_b$  считаются заданными. Далее при решении задачи с конкретным соотношением параметров, в выражении токов подставляются в качестве первого приближения  $I_a = I_b = 0$ . По полученным кривым определяют графическим путем постоянные составляющие  $I_a$  и  $I_b$ , которые снова подставляются в выражения для токов в качестве второго приближения и т. д.

Расчеты, проведенные графо-аналитическим способом последовательных приближений по формулам, полученным в результате решения в общем виде дифференциальных уравнений для схемы фиг. 6, показали, что наличие на первичной стороне активного сопротивления  $r_1 = 0,1$  практически не влияет на характер и величину токов обратного зажигания [Л-6]. Так как в реальных мощных установках, как правило,  $r_1 < 0,1x_{12}$ , то в инженерных расчетах установившегося режима обратного зажигания можно пренебречь первичным или эквивалентным ему активным сопротивлением (ошибка при этом меньше 3—4%).

Пренебрегая первичным активным сопротивлением, а также падением напряжения в дуге вентиляей, получим в случае непрерывного тока в обратно горящем вентиле для расчета токов обратного зажигания в простейшей схеме следующие выражения:

Интервал;  $0 < \psi < \lambda_1$

$$i_a^{(1)} = I_m \left[ \cos(\alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}) \varepsilon^{-\psi \operatorname{tg} \varphi} - \cos(\psi + \alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}) \right]$$

$$i_b^{(1)} = I_m \left[ \sin(\lambda_1 + \alpha + \varphi) \varepsilon^{(\lambda_1 - \psi) \operatorname{tg} \varphi} - \sin(\psi + \alpha + \varphi) \right]$$

$$i_c^{(1)} = i_a^{(1)} + i_b^{(1)}$$

II интервал;  $\lambda_1 < \nu < \frac{2\pi}{3}$

$$i_a^{(II)} = I_m \left[ \cos\left(\alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}\right) \varepsilon^{-\nu \operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{2} \sin(\lambda_1 + \alpha + \varphi) \varepsilon^{-(\nu - \lambda_1) \operatorname{tg} \varphi} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\nu + \alpha + \varphi) \right]$$

$$i_c^{(II)} = i_a^{(II)}$$

III интервал;  $\frac{2\pi}{3} < \nu < \frac{2\pi}{3} + \lambda_2$

$$i_a^{(III)} = I_m \left[ \sin\left(\lambda_2 + \alpha + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \varepsilon^{(\lambda_2 - \nu + \frac{2\pi}{3}) \operatorname{tg} \varphi} + \sin\left(\nu + \alpha + \varphi - \frac{\pi}{3}\right) \right]$$

$$i_b^{(III)} = I_m \left[ \cos\left(\alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}\right) \varepsilon^{-(\nu - \frac{2\pi}{3}) \operatorname{tg} \varphi} - \cos\left(\nu + \alpha + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$i_c^{(III)} = i_a^{(III)} + i_b^{(III)}$$

IV интервал;  $\frac{2\pi}{3} + \lambda_2 < \nu < 2\pi$

$$i_b^{(IV)} = I_m \left[ \cos\left(\alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}\right) \varepsilon^{-(\nu - \frac{2\pi}{3}) \operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{2} \sin\left(\lambda_2 + \alpha + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \varepsilon^{-(\nu - \lambda_2 - \frac{2\pi}{3}) \operatorname{tg} \varphi} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\nu + \alpha + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

$$i_c^{(IV)} = i_b^{(IV)}$$

(3)

где

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{x_{12}^2 + r_{12}^2}} \approx \frac{E_m}{x_{12}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{r_{12}}{x_{12}};$$

$E_m$  — амплитудное значение ЭДС;

$\alpha$  — угол регулирования,

$\omega t = \vartheta$  — переменный угол ( $\vartheta = 0$  в момент подачи зажигающего импульса на вентиль «а»),

$\varepsilon$  — основание натуральных логарифмов.

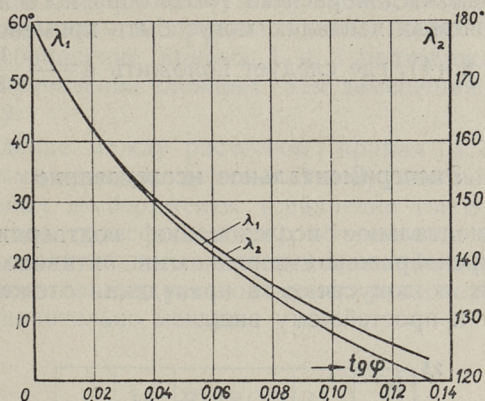
Углы коммутации  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  определяются из трансцендентных уравнений:

$$\sin(\lambda_1 + \alpha + \varphi) \varepsilon^{\lambda_1 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{2 - 2\varepsilon^{2\pi \operatorname{tg} \varphi} + 3\varepsilon^{\frac{2\pi}{3} \operatorname{tg} \varphi}}{4\varepsilon^{2\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1} \cos\left(\alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}\right) \quad (4)$$

$$\sin\left(\lambda_2 + \alpha + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \varepsilon^{\lambda_2 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{2 - 2\varepsilon^{2\pi \operatorname{tg} \varphi} + 3\varepsilon^{\frac{4\pi}{3} \operatorname{tg} \varphi}}{4\varepsilon^{2\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1} \cos\left(\alpha + \varphi + \frac{\pi}{6}\right)$$

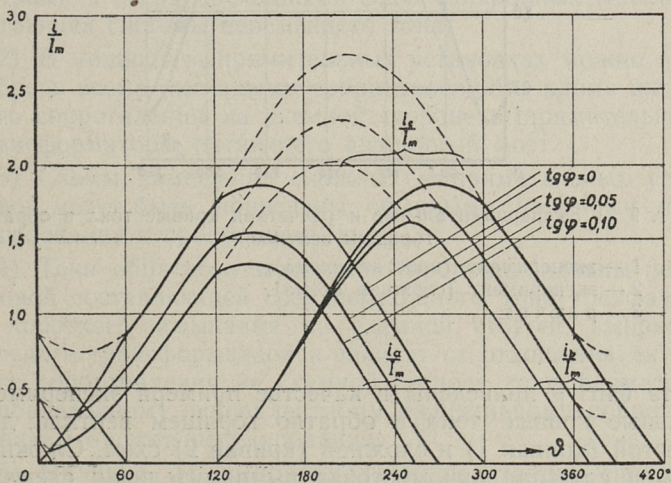


Токи обратного зажигания имеют наибольшее значение при угле регулирования  $\alpha=0$ . С увеличением  $\alpha$  токи обратного зажигания уменьшаются.



Фиг. 7 — Зависимость углов коммутации  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от  $\text{tg } \varphi$  при  $\alpha=0$ .

На фиг. 7 приведены зависимости углов коммутации  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от  $\text{tg } \varphi$  при  $\alpha=0$  и на фиг. 8 — кривые токов обратного зажигания для трех значений  $\text{tg } \varphi$  при  $\alpha=0$ .

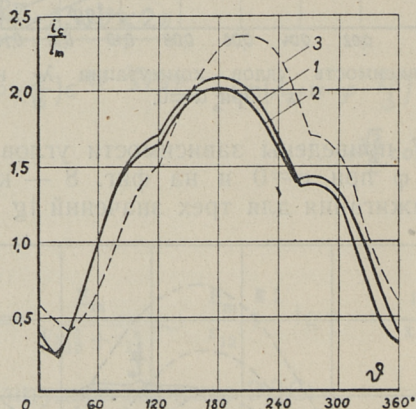


Фиг. 8 — Кривые токов обратного зажигания для  $\text{tg } \varphi = 0; 0,05; 0,10$  при  $\alpha = 0$ .

В случае неуправляемых вентиляей зажигание вентиляей «а» и «b» при обратном зажигании происходит на  $30^\circ$  раньше, чем в случае управляемых вентиляей при  $\alpha=0$ . Таким образом, для расчета токов обратного зажигания в неуправляемых вентиляях могут быть применены выражения (3) и (4), где следует положить  $\alpha = -\frac{\pi}{6}$ .

### Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование подтвердило допустимость пренебрежения первичными активными сопротивлениями и допустимость приведения сложной схемы замещения к простейшему виду.



Фиг. 9 — Экспериментальные и расчетная кривые тока в обратно горящем вентиле.

- 1 — эксперимент (простая схема),
- 2 — эксперимент (сложная схема),
- 3 — расчет.

На фиг. 9 приведены в качестве примера экспериментальные кривые тока в обратно горящем вентиле для простой (кривая 1) и сложной (кривая 2) схем. Сложной схемой служила одноставовая выпрямительная схема с трехмоточным трансформатором. Питание осуществлялось со стороны первичной и третичной обмоток. Постоян-

ные времена первичной и третичной ветвей отличались в 2 раза ( $\frac{r_1}{x_1} = 0,12$ ;  $\frac{r_3}{x_3} = 0,25$ ). Эквивалентные параметры приведенной к простейшему виду сложной схемы и параметры сравниваемой простой схемы были одинаковы. Хорошее совпадение кривых 1 и 2 подтверждает допустимость приведения сложных схем замещения к простейшему виду.

Расхождение между расчетной (кривая 3) и экспериментальными кривыми (кривые 1 и 2), как показали дополнительные эксперименты (сравнение токов в отдельных обмотках трансформатора), объясняется в основном наличием значительного намагничивающего тока. В мощных выпрямительных установках это расхождение должно быть значительно меньше.

## ВЫВОДЫ

1) Исследование самого опасного режима, имеющего место при затяжном характере обратного зажигания, может быть заменено расчетом установившегося режима обратного зажигания в схеме со сверхпереходными параметрами и сверхпереходными ЭДС синхронных машин и питающей системы переменного тока.

2) В мощных выпрямительных установках можно пренебречь всеми активными сопротивлениями кроме активного сопротивления на схемной стороне выпрямительного трансформатора, питающего аварийный мост.

3) Схемы замещения сложных выпрямительных установок могут быть приведены обычными приемами преобразования к простейшему виду.

4) Токи обратного зажигания пропорциональны переменной составляющей сверхпереходного тока трехфазного короткого замыкания на схемной стороне выпрямительного трансформатора и зависят от отношения активного сопротивления на схемной стороне трансформатора к приведенному эквивалентному индуктивному сопротивлению и от угла регулирования.

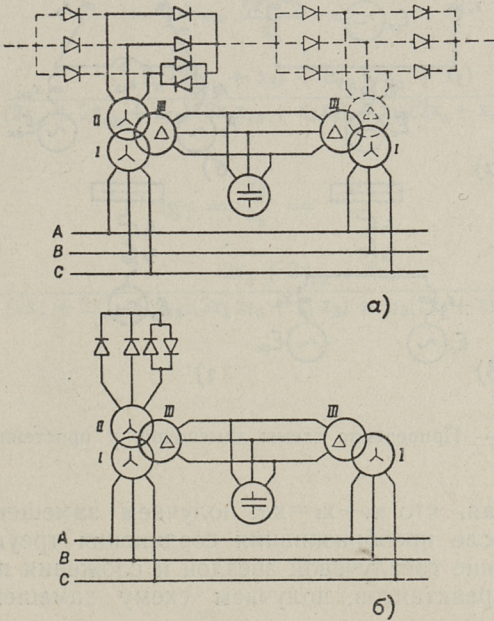
5) Наличие на выпрямительной подстанции синхронных компенсаторов, подключенных к выпрямительным трансформаторам (особенно мощных синхронных ком-

пенсаторов, предназначенных для покрытия реактивной мощности двух мостов), приводят к значительному (в зависимости от схемы 1,5—2-кратному) увеличению токов обратного зажигания по сравнению с простыми мостовыми выпрямительными схемами с двухобмоточными трансформаторами.

В заключение считаю долгом выразить благодарность к. т. н., ст. научн. сотр. ЭНИН АН СССР А. М. Утевскому, под руководством которого была выполнена настоящая работа.

Пример приведения схемы замещения к простейшему виду

Если пренебречь выпрямленным током, то двухмостовая схема выпрямления (фиг. 10,а) приводится к схеме с тремя вентилями (фиг. 10,б). Соответствующая однолинейная схема замещения приведена на фиг. 11,а, где:



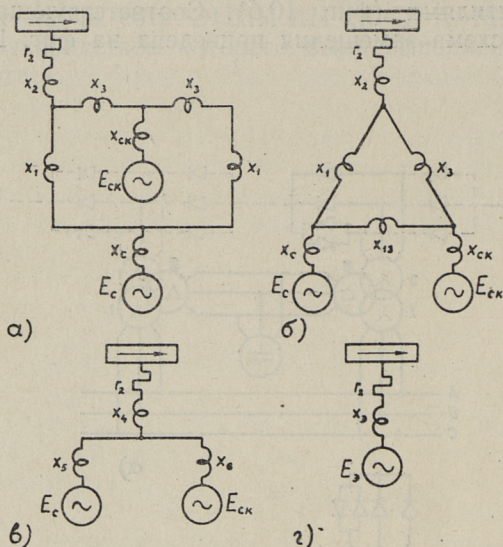
Фиг. 10 — Упрощение двухмостовой схемы выпрямления при пренебрежении элементами, не обтекаемыми аварийными токами.

$x_1, x_2, x_3$  — реактансы лучей замещения трехобмоточного трансформатора;

$x_c, x_{ck}$  — сверхпереходные реактансы питающей системы переменного тока и синхронного ком-

$r_2$  — активное сопротивление схемной обмотки трансформатора;

$E_c, E_{ck}$  — эффективные значения сверхпереходных ЭДС питающей системы переменного тока и синхронного компенсатора.



Фиг. 11 — Приведение схемы замещения к простейшему виду.

Учитывая, что  $x_1 + x_2 = x_{13}$ , получаем замещения (фиг. 11, б). После преобразования соединения треугольником в соединение трехлучевой звездой и сложения последовательных реактансов, получаем схему замещения (фиг. 11, в), где

$$x_4 = x_2 + \frac{x_1 x_3}{2x_{13}}; \quad x_5 = x_c + \frac{x_1}{2}; \quad x_6 = x_{ck} + \frac{x_3}{2}.$$

Определяя эквивалентный реактанс параллельных ветвей и складывая его с реактансом  $x_4$ , получаем однолинейную простейшую схему замещения (фиг. 11, г), где эквивалентный реактанс

$$x_3 = x_2 + \frac{x_1 x_3}{2x_{13}} + \frac{(2x_c + x_1)(2x_{ck} + x_3)}{2(2x_c + 2x_{ck} + x_{13})}$$

и эквивалентный ЭДС

$$E_3 = \frac{E_c(2x_{ck} + x_3) + E_{ck}(2x_c + x_1)}{2x_c + 2x_{ck} + x_{13}}$$

Амплитудное значение периодической составляющей сверхпереходного тока короткого замыкания

$$I_m = \frac{\sqrt{2} E_3}{x_3} =$$

$$= 2\sqrt{2}x_{13} \frac{E_c(2x_{ck} + x_3) + E_{ck}(2x_c + x_1)}{(2x_c + 2x_{ck} + x_{13})(2x_2x_{13} + x_1x_3) + x_{13}(2x_c + x_1)(2x_{ck} + x_3)}$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{r_2}{x_3} =$$

$$= 2r_2x_{13} \frac{2x_c + 2x_{ck} + x_{13}}{(2x_c + 2x_{ck} + x_{13})(2x_2x_{13} + x_1x_3) + x_{13}(2x_c + x_1)(2x_{ck} + x_3)}$$

$$\frac{(x^2 + 2x + 1)(x^2 + 2x + 1)}{(x^2 + 2x + 1)} + \frac{x^2 + 2x + 1}{x^2 + 2x + 1} = 2$$

$$E = \frac{E_1(x^2 + 2x + 1) + E_2(x^2 + 2x + 1)}{x^2 + 2x + 1}$$

Делителем является Делителем является линейное соотношение

$$= \frac{13x^2}{x^2} = 13$$

$$\frac{(x^2 + 2x + 1)(x^2 + 2x + 1)}{(x^2 + 2x + 1)(x^2 + 2x + 1)} = \frac{13x^2}{x^2 + 2x + 1}$$

$$= \frac{13x^2}{x^2 + 2x + 1}$$

$$= \frac{13x^2 + 26x + 13}{x^2 + 2x + 1}$$



## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Петров — Электродинамические усилия в обмотках трансформаторов для ртутных выпрямителей. «Бюллетень ВЭИ» № 5, 1935.
2. А. М. Утевский — Электромагнитные процессы при аварийных режимах выпрямительных агрегатов (короткие замыкания и обратные зажигания). «Известия АН СССР, ОТН», № 2, 1949.
3. А. М. Утевский, К. П. Собинов, Э. А. Тийгимяги — Аналитическое исследование нормальных рабочих режимов инвертора и главного трансформатора инвертора при компенсации реактивной мощности статическими конденсаторами для двух принципиальных схем конструктивного размещения обмоток по сердечникам трансформатора. Отчет ЭНИН АН СССР, 1956.
4. А. М. Утевский — К вопросу о методике исследования электромагнитных процессов в преобразовательных установках. «Известия АН СССР, ОТН», № 3, 1953.
5. А. Ф. Крогерис — Режимы источников питания 3-фазных мостовых выпрямительных схем. Диссертация, 1954.
6. Э. А. Тийгимяги — Исследование и разработка методики расчета токов обработки зажигания в сложных одно- и много-мостовых выпрямительных схемах. Отчет ЭНИН АН СССР, 1957.
7. С. А. Ульянов — Короткие замыкания в энергетических системах ГЭИ, 1952.



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно  
Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно

Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно  
Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно

Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно  
Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно

Исследования в области электротехники — автор А. А. Терно

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА  
ТОКОВ ОБРАТНОГО ЗАЖИГАНИЯ В СЛОЖНЫХ ОДНО- И  
МНОГОМЕСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМАХ**

Издательство — Таллинского Политехнического Института

Издательство — Таллинского Политехнического Института

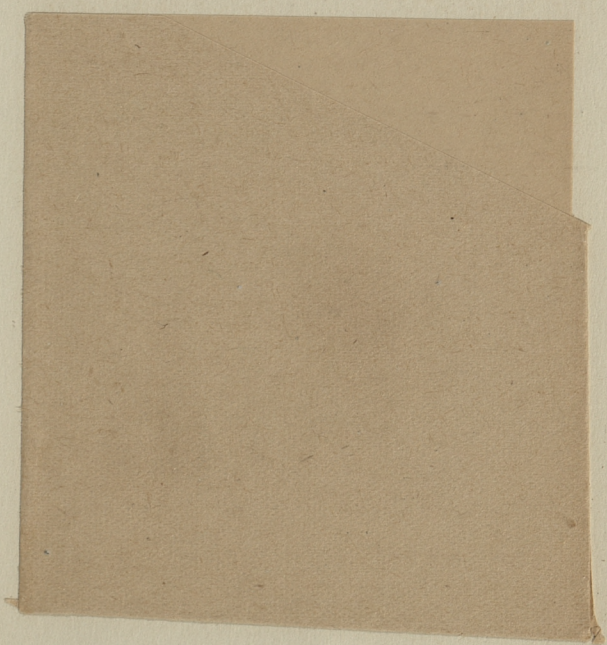
Редактор О. Терно  
Технический редактор А. Тамм  
Корректор О. Пикков

Сдано в набор 24 V 1958. Подписано к печати II VI 1958. Бумага 54×84 1/16. Печатных листов 1,5. По формату 60×92 печатных листов 1,23. Учетно-издательских листов 0,93. Тираж 800. МВ-04838.

Заказ 3848.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк 2.

Цена 70 коп.



Цена 70 коп.