



А.М. Репин. Новые, простые, унифицированные формулы среднего (по Эйлеру-Фурье) значения тока нагрузки вентильных конвертеров электроэнергии

Repin Arkadiy M. New unified formulae of the average current of the valve electrical converters

Анонс-предисловие. За тысячелетия человечества известно огромное множество (ещё более не известно) печальных фактов торможения новых результатов. Изобретений. Открытий. Высказываний. Представлений. Уничтожения увидевших свет. Опубликованных. Гибели не ставших общим достоянием.

Один из общеизвестных примеров в истории – трагедия **Великого Учёного, Человека, Итальянца Джордано (Филиппо) Бруно. 1548 – 18.2.1600.** Он не отрёкся от своих убеждений. “Заблуждений” “еретика”. От “ереси” («**хотя он и редчайший гений**»).. «**Дух** его не был сломен. За **7** лет пыток и мучений в тюрьме римской инквизиции. И даже будучи уже привязанным цепями к столбу. Со сдавленным специальными тисками языком». **Сожжён.** Публично. На площади. По приговору инквизиторов. Решению Папы Климента VIII. “Светского” суда. Губернатора Рима. Гений казнён. Убит. **Убиен.** Ультра-Преступниками против Человечества.

И подобных примеров – не шесть.

Отнюдь, не с претензией на “великость”, а лишь как факт по схожести деяний, тормоза достижений, не ставших своевременным достоянием людей, **ниже, впервые** в виде **электронных скан-копий** (причём, повторных, **11.1.2013**; первые **уничтожены 7.1.2011**; как и многое другое; злобы “**сожгли**” жёсткий диск моего ПК) **представлен уникальный материал. Формулы.** Полученные мною лишь на энтузиазме за годы бескорыстного труда **Математические** выражения для **тока I_o полезной нагрузки базовых m -фазных схем вентильных конвертеров электроэнергии (БВК ЭЭ).** Причём, не опубликованные в данном виде формулы. Удалось получить лишь **справку** о депонировании. № **3-5920.** От **11.6.1979.** Через **7 лет** (опять **7**) торможения и отказа в опубликовании. В различных организациях и редакциях. МЭИС, ВЗЭИС, п/я А-1427, ж. Электромеханика (Изв. ВУЗов), н.-т. сборник ВРЭ (МинРадиоПром), др. Справка же – лишь документ. О наличии такого материала. В архиве. О факте авторства. Возможного приоритета. Но не о широкой доступности. К тому же материал в архиве сохраняется короткое время. Тем самым, формулы, по сути, загублены. Инками **XX** века.

Отныне, **40 лет** спустя, возможно частичное знакомство.

Реферат

УДК 621.314.6. **Расчёт среднего тока полезной нагрузки вентильных преобразователей (конвертеров ЭЭ). А. М. Репин.**

По материалам зарубежной и отечественной литературы в работе даны результаты обзора современного состояния проблем по расчёту режимных показателей вентильных схем различных классов. Показано, что качество расчёта радиоэлектронной аппаратуры (**РЭА**), в том числе вентильных преобразователей (**ВП**), является на сегодня важным параметром. Утверждается непосредственная связь качества разработки РЭА и ВП с инженерным расчётом их энергетических показателей, В частности, одного из них – среднего значения тока полезной нагрузки.

Существующая в настоящее время неупорядоченность и разобщённость терминов и обозначений, большое число соотношений, нередко противоречивых или даже ошибочных, неизученность ряда классов схем и их режимов создают значительные трудности при восприятии публикуемого и написании и написании нового материала. А также при проектировании, разработках и эксплуатации ВП.

Предложена унифицированная система обозначений вентильных, их элементов, режимов, переменных состояния, угловых величин. Даны полученные на единой физико-математической и методической основе простые расчётные соотношения среднего тока нагрузки и математически замкнутые уравнения связи моментов переключения вентилей с параметрами схемных элементов для **27** классов неуправляемых ВП. Приведена универсальная структурная схема расчётов ВП на ЭЦВМ. Новые авторские результаты сопоставлены с известными и путём выявления достоинств оценены уровни практической их полезности и новизны. Таблиц. 1.

P.S. Последний абзац приведен в межотраслевом реферативном сборнике ВИМИ.

РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ТОКА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ
ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

SmrRlC

$$\frac{\sin \lambda \cos(\psi + \lambda - \beta)}{\theta(1+n) \sin \beta}; 0 \leq I_0 \leq I_{окр}$$

$$\operatorname{ctg} \psi = (e^{(2\theta - \lambda)\delta} - \cos \lambda) \operatorname{csc} \lambda;$$

$$e^{\xi(\lambda - 2\theta)} = \frac{\sin \beta_p - A \sin(\beta_p - \lambda)}{\sin(\lambda + \beta_p) - A \sin \beta_p};$$

$$A = e^{-\lambda \delta_0}; \delta_0 = \operatorname{tg} \beta_0 = \frac{1+n}{n} \delta;$$

$$0 \leq \beta = \operatorname{arctg} \omega RC \leq \beta_{кр};$$

$$e^{-2\theta \delta_{окр}} = \frac{\cos(\beta_{кр} + \theta)}{\cos(\beta_{кр} - \theta)};$$

$$I_{окр} = \sin \theta / (1+n)\theta; \beta_p = \beta_0 - \beta$$

SkmrER

$$\frac{1}{\theta} \left[\frac{\sin \theta \cos(k\theta + \gamma_k)}{\cos \gamma_k \cos(\theta - \gamma_k)} - \varepsilon P \right];$$

$$P = (n \operatorname{tg} \gamma_k + k^+ \gamma_k) / \gamma_k + [n \operatorname{tg}(\theta - \gamma_k) + k(\theta - \gamma_k)] / \gamma_k^-; 0 \leq \varepsilon \leq \cos \theta;$$

$$N_{(k)} = N_{0(k)} [1 - \varepsilon \operatorname{sc}(k\theta + \gamma_k)]; \gamma_{кр(k)} = \theta$$

Sm l r Rl C ∞

$$\sin \psi; \operatorname{ctg} \psi = (2n_0 \theta + \lambda - \sin \lambda) / (1 - \cos \lambda);$$

$$e^{-\lambda \delta_B} = \frac{\sin^2 \lambda - A \cos \psi}{B \sin \psi}; n_{окр}^+ = A_{кр} \sin \theta / \theta;$$

$$A = (\theta n_0 + \lambda) \sin(\lambda - \psi) + \sin \lambda \sin(\psi - \lambda); B = (\theta n_0 + \lambda) \times$$

$$\times \cos \psi - \sin \lambda \cos(\psi - \lambda); I_{окр} = \sin \operatorname{arctg}(\theta n_{окр}^+ \operatorname{csc}^2(\theta - \operatorname{ctg} \theta));$$

$$A_{кр} = \frac{\sin \theta + \cos \psi \sin(\theta - \psi) + \sin \psi \cos(\theta + \psi) e^{-2\theta \delta_B}}{[\sin(2\theta - \psi) + \sin \psi e^{-2\theta \delta_B}] \cos \psi} /$$

Sk m l r R L ∞

$$\sin k^+ \theta \sin(\psi_k + k\theta) / \sin \theta - k^+ \sin \psi_k^*);$$

$$k\theta N_k = I_0^{-1}(k) \sin k\theta \sin(\gamma_k + \psi_k + k\theta) (\cos \gamma_k -$$

$$- I_k \sin \gamma_k) - (\theta - \gamma_k / k^+); \operatorname{tg} \psi_{кр(k)} = [a_k \sin \gamma_k \times$$

$$\times \cos(k\theta + \gamma) + 0,5 \sin 2(\theta - \gamma)] / [a_k + \sin \gamma \times$$

$$\times \sin(k\theta + \gamma) + \sin^2(\theta - \gamma)]; \gamma_k = \gamma_{кр(k)};$$

$$a_{k^+} = \sin k^+ \theta / k^+ \sin \theta$$

На основе анализа современного состояния вопроса проведена систематизация вентильных преобразователей и их режимов и даны простые унифицированные соотношения по расчёту среднего тока полезной нагрузки вентильных схем различных классов.

Введение. Наряду с обеспечением высоких энергетических показателей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) особое значение за последнее время приобрели такие показатели, как масса, габариты, надёжность, качество и стоимость изделий. Первые три из них более существенны для передвижной аппаратуры, в частности бортовой, последний (стоимость) — для устройств общепромышленного применения и бытовых приборов. Что касается качества, то оно стало на сегодня определяющим для изделий любого назначения.

Достижение указанных показателей и, прежде всего, качества зависит не только от оригинальности и практической приемлемости схемных и конструкторских решений, используемой элементной базы, уровня унификации элементов и технологичности процесса производства, но в значительной мере также от того, насколько правильно и, следовательно, качественно выполнен инженерный расчёт режимно-энергетических показателей входящих в РЭА узлов и элементов.

Неотъемлемой и наиболее ответственной, в плане обеспечения работоспособности других устройств, частью всякой аппаратуры: наземной или бортовой, транспортируемой, переносной или стационарной — являются вентильные преобразователи различных классов. Они отличаются типом применяемых фильтров, числом вентиляей и характером сопротивлений "внутренних" элементов: трансформаторов, ограничительных либо регулировочных дросселей, резисторов, преобразующих диодов, тиристоров, транзисторов различного типа и пр.

Одним из важнейших режимных показателей вентильных преобразовате-

лей (ВП) считают среднее (по Фурье) значение тока полезной ^{*)} нагрузки I_0 . Обширное разнообразие схем ВП привело к тому, что в настоящее время для I_0 известно очень большое количество расчётных формул. Однако получены они или приводятся в литературе разными авторами и, как правило, на основе различных физико-математических предположений, что затрудняет применение таких формул не только при индивидуальном, но особенно при типовом проектировании схем различных классов. И хотя для инженерной практики чрезвычайно важен высококачественный расчёт режимных показателей устройств, в литературе до сих пор отсутствует обзор и объективный анализ накопленных за многие десятилетия расчётных соотношений для ВП, в том числе по I_0 .

В данной работе дан анализ современного состояния вопроса и предпринята попытка устранить существующий пробел путем модернизации старых и создания новых расчётных формул, представленных для I_0 в унифицированном и более высококачественном виде.

2. Анализ известных соотношений. Проведенный анализ зарубежных и отечественных публикаций показал:

- для многих классов ВП известные по I_0 формулы верны, но некоторые из них сложны, либо громоздки, либо даны в незаконченном ("сыром") виде; по этим причинам последние малопригодны для повсеместной инженерной практики, особенно при оперативных или многократных (по методу проб) расчётах;

- опубликованные соотношения отличаются значительным разнообразием обозначений, причём не только для одинаковых по физическому смыслу величин, относящихся к различным классам схем, но и для величин одних и тех же классов;

- встречаются выражения, которые трудно отнести к определённому классу схем, поскольку исходные предположения при этом либо вовсе не приводятся, либо изложены недостаточно чётко;

*) В отличие от общей под полезной понимают такую нагрузку (устройство), которая подключена не непосредственно к выходу ВП, а после фильтра.

- во всех соотношениях ток I_0 зависит от моментов переключения вентилей: начала их открытия ψ , длительности (угла) коммутации (перекрытия) γ , угла горения или открытого состояния Λ и т.п.; однако по многим классам ВП выражения для этих моментов не получены либо представлены в незамкнутом относительно параметров схемных элементов виде, что создает неопределённость при практических расчётах ВП;

- для большинства известных формул не найдены границы или области параметров схемных элементов, в пределах которых эти формулы верны (физически корректны);

- для некоторых классов ВП встречаются расчётные соотношения, содержащие опечатки, зачастую неочевидные;

- встречаются принципиально ошибочные соотношения;

- по ряду классов схем результаты вообще отсутствуют.

Указанное состояние вызывает неуверенность у разработчика и серьёзные затруднения при расчётах ВП различных классов, особенно на этапе создания достаточно качественных типовых методов машинного проектирования ВП, который, как известно, является в настоящее время одним из центральных в общей политике применения ЭВМ в научных исследованиях и разработках РЭА.

Таким образом, отсутствие простых и, вместе с тем, унифицированных соотношений сдерживает решение общей задачи по автоматизации проектирования вентильных преобразователей энергии, как следствие, радиоэлектронной аппаратуры в целом.

Далее эта проблема в части I_0 решена полностью, во всяком случае для большинства известных классов неуправляемых ВП.

3. Основные результаты и обозначения. С целью упорядочения и наглядности результатов, а также сокращения объёма все расчётные соотношения различных классов ВП сведены в таблицу и даны в приложении I. Класс схем указан во второй колонке. Он отражает совокупность ВП, представленных единой схемой замещения. Для сокращения,

определённости и удобства изложения конкретные классы ВП обозначены латинскими буквами в соответствии с элементами схем. При работе ВП в коммутационных режимах k -го порядка к обозначению добавляется буква k . Например, класс $SkmrRl_{\infty}$ отражает совокупность m -фазных схем ВП с нагрузкой индуктивного характера, при синусоидальной (S) форме фазных эдс, учёте активных (r) сопротивлений внутренних элементов (трансформатора, вентиля и пр.), работе в k -м режиме и допущении индуктивности L первого элемента выходной ветви (например, дросселя фильтра, обмотки двигателя, реле, контактора и т.п.) равной бесконечности. Широко используемое допущение $L \rightarrow \infty$ или $C \rightarrow \infty$ является условным. Оно существенно упрощает выкладки и изложение, поскольку при сохранении в общих чертах физической сущности явлений снижает порядок интегрально-дифференциальных или операторных уравнений.

Аналогичны обозначения классов ВП, содержащих параллельные ($R||C$) либо Γ -образные ($R_{\Sigma}R||C$) ёмкостные фильтры. При этом в таблице эти классы не разделяются, так как балластное сопротивление R_{Σ} , устанавливаемое в продольную ветвь, при работе схем в режиме прерывистого тока можно считать учтённым в r . Углы ψ, γ, Λ пояснены выше. Остальные обозначения во второй колонке означают: $l_{\mu} = l$ - индуктивность μ -й внутренней ветви ($\mu = 1, 2, \dots, m$); $E_{\mu} = E$ - противо-эдс E_0 в цепи нагрузки либо напряжение смещения вентиля E_c , отражающее нелинейность начального участка их реальных авх; $\theta = \pi/m$ - полпериода огибающей фазных эдс.

В четвертой колонке указаны типы режимов ВП:

$P=Z$ - режим, при котором интервал повторяемости процессов \mathcal{V}_n содержит подынтервал полного закрытия всех вентилях внутренних ветвей;

$P=K$ - режим, при котором \mathcal{V}_n содержит подынтервал одновременной работы двух или более внутренних ветвей и не содержит подынтервалов, характерных для $P=Z$; в режимах k -го порядка (типа $P=K_k$) интервал \mathcal{V}_n содержит два подынтервала: k -й и k^{-} -й, в которых од-

новременно работает соответственно k^+ и k ветвей, где $k^\pm = k \pm 1$; режим $P=Z$ можно отнести также к k -му, если положить $k=0$;

$P=H$ - режим, при котором в любой момент времени работает только одна внутренняя ветвь (ни $P=Z$, ни $P=K$ режим);

$P=Z_B$ - разновидность режима $P=Z$, отличающаяся от него тем, что в данном режиме общий за π интервал Λ проводимости вентиля содержит подынтервал его непроводящего (закрытого) состояния.

Состояния $P=Z$ и $P=Z_B$ соответствуют режимам прерывистого выходного тока, $P=K$ и $P=H$ - режимам непрерывного тока. Указанные состояния являются основными для ВП. Более сложные состояния, представляющие комбинацию основных или принципиально отличающиеся от них, здесь не рассматриваются.

Пятая колонка содержит математические результаты, полученные автором, а именно: унифицированные формулы среднего тока I_0 , уравнения связи моментов переключения вентиля с определяющими параметрами схем и соотношения критических значений этих параметров, отражающие условия критичности или перехода схем из одних режимов в другие. Формулы тока I_0 даны в приведенных к основанию $\theta_i = S_a/R$ либо $\theta_i = S_a/r$ (отмечены *) безразмерных единицах, что позволяет использовать их независимо от конкретных требований нагрузки. Само обозначение I_0 и знак равенства опущены. Уравнения связи параметров и критичности состояний даны полностью. Обозначено: S_a - амплитуда фазных эдс; $n = r/R = 1/N$, $g = 1/\delta = \operatorname{tg} \varphi = \omega L/R$, $\delta_c = 1/g_c = \operatorname{tg} \beta = 1/\omega RC$, $\varepsilon = E/S_a$, $g_B = 1/\delta_B = \operatorname{tg} \varphi_B = \omega l/r$, $g_R = 1/\delta_R = \operatorname{tg} \varphi_R = \omega l/R$ - определяющие параметры; $n^\pm = n \pm 1$, $y^- = y - 1$, $\gamma = \gamma/2$, $\lambda = \Lambda/2$.

В шестой колонке с целью сравнения даны неунифицированные соотношения, полученные или приводимые другими авторами. Обозначения оригиналов сохранены. Расшифровка опущена. Из сопоставления с унифицированными результатами ясны существенные достоинства последних: компактность и простота, единообразие и упорядоченность, удобство

практического использования, математическая замкнутость и соответствие исходным предпосылкам, физико-математическая законченность и лёгкость идентификации при обработке на ЭВМ, наличие соотношений для режимов и классов ВП, ранее не исследованных, и, напротив, отсутствие принципиальных препятствий на пути использования результатов для разработки методов машинного проектирования. Общая для всех классов ВП структурная схема расчётов на ЭЦМ дана в приложении 2.

Заключение. В соответствии с поставленной задачей:

- в работе выполнен анализ современного состояния вопроса по материалам отечественных и зарубежных публикаций,
- вентильные преобразователи энергии систематизированы по классам путём введения простых отличительных признаков,
- осуществлена систематизация режимов ВП, различаемых по физическим состояниям вентилях за интервал повторяемости процессов,
- приведена единая унифицированная система обозначений элементов ВП, а также их классов, режимов и обобщённых "определяющих" параметров,
- на единой физико-математической основе получены простые, практически удобные выражения для I_0 по всем рассмотренным классам и режимам ВП, в том числе по не изученным в литературе,
- применительно к коммутационным режимам формулы для I_0 получены не отдельно по каждому режиму каждой схемы (как это обычно выполняют), а в рекуррентном виде для любого k -го режима при произвольном числе фаз,
- для всех классов схем и **их типов режимов** найдены замкнутые уравнения связи моментов переключения вентилях с "определяющими" параметрами схем,
- определены критические значения таких параметров, отражающие переход схем из одних режимов в другие, тем самым оценены границы математической корректности разработанных по этим классам теорий, в частности уравнений связи и формул для I_0 ,
- вновь полученные результаты сопоставлены с известными, и путём выявления достоинств оценены уровни их практической полезности и новизны.

Формулы тока I_0 и уравнения связи

№	Класс схем	m	Тип режима	Унифицированные соотношения	Унифицированные соотношения	Примечание
1	SmR	>1	P<H	$\theta^{-1} \sin \theta$	$\frac{U_{max}}{R_H} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}; \sqrt{2} U_2 \frac{m}{2\pi R_H} \sin \frac{\pi}{m}, \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} I_{amax}; I_{amax} = \frac{E_{EM}}{R_d}$	
2	SmRL ₀ SmRL	>1	P<H	$\theta^{-1} \sin \theta$		15
3	SmER	>2	P<H	$\theta^{-1} \sin \theta - \varepsilon$		15
4	SmRLC	≥1	P<B	$\sin^2 \lambda / \theta \sin \beta;$ $\cos(\lambda - \beta) \text{сг} \beta = e^{-(2\theta - \lambda) \delta_c}$ $0 \leq \beta = \arctg \omega RC \leq \beta_{кр};$ $\beta_{кр} = \theta \leftarrow m > 1; I_{акр} = \sin \theta / \theta$	$\frac{m}{2\pi} I_s \left[\frac{(\sin \theta_1 - \sin \psi_1) - (\theta_1 - \psi_1) \cos \theta_1}{\cos \psi_1 - \cos \theta_1} + \frac{(\sin \theta_2 - \sin \psi_2) - (\theta_2 - \psi_2) \cos \theta_2}{\cos \psi_2 - \cos \theta_2} \right] + (\psi_1 + \psi_2) +$	2 6 9 10 14
5		>2	P<H	$\sin \theta / \theta, \text{ при } \beta_{кр} \leq \beta \leq \pi/2$	$\frac{1}{2\pi R_H} \left[\int_{\psi_0}^{\psi_0 + \theta} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t + \int_{\psi_0 + \theta}^{2\pi + \psi_0} \sqrt{2} U_2 e^{-\omega CR_H} d\omega t \right]$	4 6 16
6	SmR	1 2	P<B P<H	$1/\theta(1+n)$	$\frac{\sqrt{2} E_2}{2\pi R_d} \left[\cos \varphi + \omega CR_d \left(1 - e^{-\frac{3\pi + \varphi}{2} - \omega CR_d} \right) \right]$	8
7		>2	P<K _k	$\frac{\sin k\theta}{y_k^- \cos \gamma_k}; r_{0(k)} = y_k^- - k;$ $\gamma_{кр(k)} = \theta;$ $y_k^- = \frac{\sin k\theta \cos(\theta - \gamma_k)}{\sin \theta \cos(k\theta + \gamma_k)}$	$\frac{U_{max}}{2r_H} \left(1 + e^{-\frac{T - 2\theta}{r_H C}} \right)$	9 12 16
8	SkmR	>2	P<K ₁	$\frac{\sin \theta \text{сг} \delta}{\theta(1+n)}; \text{сг} \delta = (1+2N) \text{тг} \theta;$ $\gamma_{кр(1)} = \theta$	$\frac{1}{R_H} \frac{m}{\pi} U_{ma} \left[\frac{\sin \left(\frac{\pi}{m} - \frac{\delta}{2} \right)}{1 - \frac{R_1^1}{R_H}} + \frac{\cos \frac{\pi}{m} \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{2 - \frac{R_1^1}{R_H}} \right]; \gamma = \omega t_k - \omega t_H;$	2 6 7
9	Skmerllg	≥1	P<B	$\cos \lambda_k - \varepsilon; k = 0, 1, \dots, k_x; \lambda_{кр(k)} = k\theta;$	$\text{тг} \omega t_H = \frac{\left(1 - \frac{R_1^1}{R_H} \right) \sin \frac{2\pi}{m}}{\left(1 - \frac{R_1^1}{R_H} \right) \cos \frac{2\pi}{m} - 1}; \text{тг} \omega t_k = \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{\cos \frac{2\pi}{m} - \frac{R_1^1}{R_H} - 1}$	
10		>2	P<K _k	$\theta n_k = (\text{тг} \lambda_k - \lambda_k) / (1 - \text{сг} \lambda_k)$		

Формулы тока I_0 и уравнения связи

№	Лит.	m	Реж.	Унифицированные соотношения	Унифицированные соотношения	Прим.
11	SkmpRllc	≥ 1	$p=3$	$\cos \lambda; n\theta = \operatorname{tg} \lambda - \lambda; n\delta_{kp}^+ = \theta^{-1} \operatorname{tg} \theta$	$m \frac{U_{2\max}}{i_0 r} (\sin \theta - \theta \cos \theta); \operatorname{tg} \theta - \theta = \frac{\pi r I_0}{m U_0}$	10
12	SkmpRllc	> 2	$p=K_k$	$\cos \lambda_k; n\theta = \ln n \lambda_k; \lambda_{kp(k)} = k^+ \theta$	$\frac{2Ezm}{\pi(R_a + R_{or})} (\sin 2\delta - \theta \cos \theta); \cos \theta = \frac{Ezm}{E_H}; m=2$	7
13	SmFR	1 2	$p=3$	$\frac{\sin \lambda - \lambda \varepsilon}{\theta(1+n)}; \lambda = \arccos \varepsilon; 0 \leq \varepsilon \leq 1$	$\frac{1}{R} (U_H - \Delta U_E); U_H = U_{01E=0} = \frac{3}{\pi} V_{\phi} \left[\frac{4,23 \sin \delta}{1+1,5 \frac{r}{R}} + \frac{\sqrt{2}}{1+2 \frac{r}{R}} (\sqrt{3} \cos \delta - 3 \sin \delta) \right];$	6
14	SkmpFR	> 2	$p=K_k$	$\frac{1}{\theta} \left[\frac{\sin \theta \cos(k\theta + \delta_k)}{\cos \delta_k \cos(\theta - \delta_k)} - \varepsilon P \right];$ $P = (n \operatorname{tg} \delta_k + k^+ \delta_k) / y_k + [n \operatorname{tg}(\theta - \delta_k) + k(\theta - \delta_k)] / y_k^-; 0 \leq \varepsilon \leq \cos \theta;$	$i_0 r = \frac{\sqrt{2} V_{\phi}}{\sqrt{2} V_{\phi}}; i_0 = \frac{\sqrt{2} V_{\phi} \cos \delta + \sqrt{2} V_{\phi} \sin(30 + \delta)}{2r + R}; \Delta U_E = E \left\{ \frac{2\delta}{1+1,5 \frac{r}{R}} + \frac{1}{1+2 \frac{r}{R}} \left(\frac{\pi}{3} - 2\delta \right) \right\}; \operatorname{tg} \delta = \frac{1,5 - \sqrt{2} V_{\phi} \cos \delta}{2,59 + 1,73 \frac{r}{R}}; M=3, k=1$	9 10
15	SmRllc	≥ 1	$p=3$	$N_{(k)} = N_{0(k)} [1 - \varepsilon \operatorname{sc}(k\theta + \delta_k)]; \delta_{kp(k)} = \theta$ $\frac{\sin \lambda \cos(\psi + \lambda - \beta)}{\theta(1+n) \sin \beta}; 0 \leq I_0 \leq I_{0kp}$ $\operatorname{ctg} \psi = (e^{2\theta - \lambda} \delta_c - \cos \lambda) \operatorname{csc} \lambda;$ $e^{\delta(1-2\theta)} \sin \beta_p - A \sin(\beta_p - \lambda) = \frac{\sin(1 + \beta_p) - A \sin \beta_p}{1 + n \delta};$ $A = e^{-\lambda \delta_0}; \delta_0 = \operatorname{tg} \beta_0 = \frac{1 + n \delta}{n};$ $0 \leq \beta = \arccos \operatorname{ctg} \omega R C \leq \beta_{kp};$ $e^{-2\theta \delta_{0kp}} = \frac{\cos(\beta_{pkp} + \theta)}{\cos(\beta_{pkp} - \theta)};$ $I_{0kp} = \sin \theta / (1 + n) \theta; \beta_p = \beta_0 - \beta$	$I_{\text{мед}} = \frac{m}{2\pi} \left\{ \cos(\delta - \psi_2) - \cos(\delta + \psi_1) - \frac{1}{q} \sin(\delta + \psi_1) \left[1 - e^{-q(\psi_1 + \psi_2)} \right] \right\};$ $I_m' = \frac{E_m}{Z_{0e}}; Z_{0e} = \sqrt{\frac{(r+R)^2 + \omega^2 C^2 R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}}; \psi = 90^\circ - \psi; \operatorname{tg} \psi = \frac{1}{\alpha + \frac{1}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta^2}} = \frac{1}{r + R + \omega^2 C^2 R^2 r}; q = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1 + \frac{r}{R}}{\omega C R}; \sin(\delta - \psi_2) = \frac{-\sin(\delta + \psi_1) e^{-q(\psi_1 + \psi_2)} = 0; \cos \psi_1 = \cos \psi_2 = \frac{1}{\beta}}$ $\frac{1}{R} \frac{m \sqrt{2} U_2}{2\pi (1+n) \cos \psi} [\cos(\psi + \delta) - \cos(\psi + \lambda + \delta)]; \operatorname{tg} \delta = \omega R C;$ $\operatorname{ctg} \psi = \frac{r + R}{r \operatorname{tg} \delta}; \operatorname{ctg} \psi = \frac{\sin \lambda}{\sin \lambda}; K = e^{-\lambda \operatorname{ctg} \delta - \cos \lambda}; K = e^{-\frac{2\lambda}{m} \operatorname{ctg} \delta};$ $K e^{-\lambda \operatorname{ctg} \delta} = \frac{e^{\lambda \operatorname{ctg} \psi} \sin \beta - \sin(\beta - \lambda)}{e^{\lambda \operatorname{ctg} \psi} \sin(\beta - \lambda) - \sin \beta}; \beta = \delta - \psi$	2 3 6 10

ПРОДОЛЖЕНИЕ

ИО и уравнения связи

№	Кл.	m	Рез.	Унифицированные соотношения	Уравнения связи	Цр
16	8	>1	P < K1	$2 \sin \theta \sin \gamma^*$; $2\theta(1+N) = \gamma + \text{ctg} \gamma$ $k^+ \sin k\theta (\sin \gamma_k + T_k \cos \delta_k)$; $k^+ \theta [k N_{0(k)}]^+ = \gamma_k^+$	$\frac{E_{m1}}{r} \sin \beta$; $E_{m1} = 2E_{m2} \sin \frac{\pi}{m}$ $\frac{2E_{m2} \sin \theta}{r} \sin \frac{\delta r}{2}$; $\delta = \frac{\pi}{m}$	10 11
17	SKmRL	>1	P < Kk	$\frac{1 - T_k \text{tg} \delta_k}{\text{tg} \delta_k + T_k}$; $T_k = (\text{ctg} \theta - k \text{ctg} k\theta) / k$; $\delta_{kp(k)} = \theta$; $k = 1, 2, \dots, k_x$; $k_x = \{m + 0.5[-(-1)^m - 1]\} / 2$	$U_B = U_{Bxx} - I_0 r (1 - \frac{m\delta}{8\pi})$; $\sin \frac{\delta}{2} = \frac{I_0 m r}{2\pi U_0}$; $m = 3$ $U_B \approx \frac{2}{\pi} E_{2m} - I_B R_a + (I_B R_a)^2 / 2\pi E_{2m}$; $m = 2$	9/10 11
18	SmLRllCo	>1	P < S	$\sin \psi$; $\text{ctg} \psi = (2n_0 \theta + \lambda - \sin \lambda) / (1 - \cos \lambda)$; $e^{-\lambda \delta_B} \frac{\sin^2 \lambda - A \cos \psi}{B \sin \psi}$; $n_{0kp}^+ = A_{kp} \sin \theta / \theta$; $A = (\theta n_0 + \lambda) \sin(\lambda - \psi) + \sin \lambda \sin(\psi - \lambda)$; $B = (\theta n_0 + \lambda) \times$ $\times \cos \psi - \sin \lambda \cos(\psi - \lambda)$; $I_{0kp} = \sin \lambda \text{ctg}(\theta n_{0kp}^+ \text{csc}^2 \theta - \text{ctg} \theta)$ $A_{kp} = \frac{\sin \theta + \cos \psi \sin(\theta - \psi) + \sin \psi \cos(\theta + \psi) e^{-2\theta \delta_B}}{[\sin(2\theta - \psi) + \sin \psi e^{-2\theta \delta_B}] \cos \psi}$	$-\frac{mE_0}{2\pi r} [P \cos(\omega t - \varphi) + \omega t + \frac{Me^{-(\omega t - \frac{\pi}{2} + \varphi) \text{ctg} \psi}}{\text{ctg} \psi}] \frac{\pi - \varphi}{2}$; $P = \frac{\cos \psi}{\cos \psi}$; $M = P \sin(\psi - \frac{\pi}{2} + \varphi) + 1$; $\psi = \arctg \frac{\omega L}{r}$	4 6 7 10 13
19	SmLRllCo	>1	P < S	$\sin \psi - \varepsilon$; $0 \leq I_0 \leq I_{0kp}$; $N_{kp} = N_{0kp} (1 - \varepsilon \text{csc} \psi)$; $m > 1$; $n\theta = [\sin \lambda \sin(\psi + \lambda) - \lambda \sin \psi] / (\sin \psi - \varepsilon)$; $\text{ctg} \psi = \frac{1 - \cos \psi \cos(\lambda - \psi) - \sin^2 \psi e^{-\lambda \delta_B}}{[\sin(\lambda - \psi) + \sin \psi e^{-\lambda \delta_B}] \cos \psi}$	$\frac{P U_0}{\pi r} \frac{1}{2} \left\{ M \left[\sin(\beta - \psi) + \sin(\theta + \psi) \right] - (\beta + \theta) + N \text{tg} (e^{-\lambda} - 1) \right\}$; $N = M \cos(\theta + \psi) - 1$; $\lambda = (\theta + \beta) \text{ctg} \psi$; $\psi = \arctg \omega L_p / r$	6 7 10 13
20	SmLRllCo	>1	P < K1	$\frac{2 \sin \theta}{2\theta + g_R}$; $g_R = 2\theta \text{tg}^2 \gamma$; $0 \leq I_0 \leq I_{0kp}$; $\text{tg} \gamma = T = \frac{I_0}{I_{0kp}}$ $= \frac{2 \sin \theta \sin 2\theta}{\sin 3\theta}$; $I_{0kp} = \frac{\sin \theta}{2\theta} (1 + \sqrt{1 + T^2}) = f(m)$	$\frac{E_{m1}}{2\omega L_s} (1 - \cos \delta)$; $E_{m1} = 2E_m \sin \frac{\pi}{m}$ $\gamma_x = \arccos(1 - \frac{2\omega L_s}{U_x})$; $\Delta U_x = U_x \frac{1 - \cos \delta_x}{2}$; $U_x = \frac{E_{m2} \sin \delta}{\lambda}$ $\frac{\pi E_{0xx}}{m \omega L_s} (1 - \cos \delta)$; $E_{0xx} = U_x \frac{m}{2m} \sin \frac{\pi}{m} \text{tg} \delta = \frac{\sin \frac{\pi}{m} \sin \frac{2\pi}{m}}{\sin \frac{3\pi}{m}}$; $I_{exp} = \frac{\pi E_{0xx} (1 - \cos \delta_{xp})}{m \omega L_s} = f(m, E_{0xx}, \omega, L_s, \delta_{xp})$	11 16
20	SmLRllCo	>1	P < K1	$\frac{2 \sin \theta}{2\theta + g_R}$; $g_R = 2\theta \text{tg}^2 \gamma$; $0 \leq I_0 \leq I_{0kp}$; $\text{tg} \gamma = T = \frac{I_0}{I_{0kp}}$ $= \frac{2 \sin \theta \sin 2\theta}{\sin 3\theta}$; $I_{0kp} = \frac{\sin \theta}{2\theta} (1 + \sqrt{1 + T^2}) = f(m)$	$\gamma = \arccos(1 - \frac{x_a I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}})$; $\delta = \arctg \frac{\sin \frac{2\pi}{m} - 2 \sin \frac{4\pi}{m}}{1 + \cos \frac{2\pi}{m} - 2 \cos \frac{4\pi}{m}}$	5 11 16

Формулы тока I_0 и уравнения связи

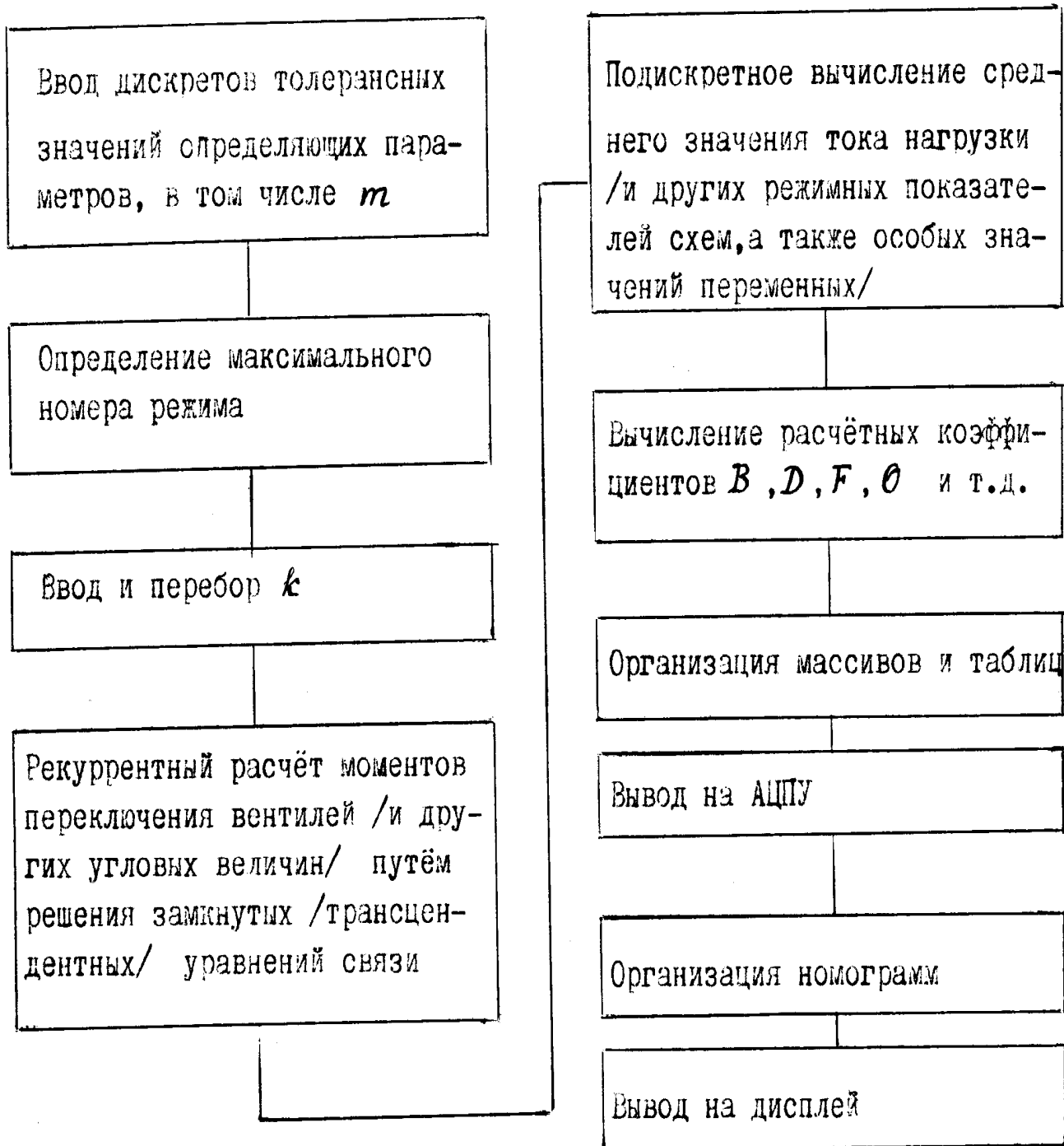
№	Стр.	m	Рек.	Унифицированные соотношения	Унифицированные соотношения	Пр.
21	SmLRllc ₈	>1	$p < \beta$	$\sin \psi; \operatorname{ctg} \psi = \lambda \operatorname{csc}^2 \lambda - \operatorname{ctg} \lambda; \lambda \operatorname{ctg} \lambda =$ $= 1 - \sqrt{\theta g_R}; g_{Rk} = 1/\theta - 2 \operatorname{ctg} \theta + \theta \operatorname{ctg}^2 \theta$	$I_d^* \frac{1 + e^{-\frac{r}{x} \delta}}{2 \cdot \sin \delta} = \sin[\gamma - (p + \vartheta)] + \sin(p + \vartheta) e^{-\frac{r}{x} \delta}; I_d^* = \frac{I_d}{\sqrt{2} x};$ $\vartheta = \arctg \frac{\omega L}{r}; M = 3 (m = 6)$	5 10 11 16
22	SmLRllc ₈	>1	$p < k$	$k \sqrt{A_k} / (k k^* \theta + g_R) \neq f(\delta_k); A_k = 1 - 2 a_k^* \times$ $\times \cos^2 \theta + a_k^2; a_k = \sin k \theta / k \sin \theta$	$I_0 r = E_m \cos \omega t_1 - E_m \cos(\omega t_1 - \frac{2\pi}{m}) = -2 E_m \sin \frac{\pi}{m} \sin(\psi_1 - \frac{\pi}{m});$ $1 + Q^2 + Q [Q + \operatorname{ctg}(\psi_1 - \frac{\pi}{m})] e^{-\frac{\pi}{m}} + [Q + \operatorname{ctg}(\psi_1 - \frac{\pi}{m})] \sin \delta +$ $+ [1 - Q \operatorname{ctg}(\psi_1 - \frac{\pi}{m})] \cos \gamma = 0; \operatorname{ctg}(\psi_1 - \frac{\pi}{m}) = \sqrt{\frac{4 E_m^2 \sin^2 \frac{\pi}{m}}{I_0^2 r^2} - 1}$	5 9 10 11 16
23	SmLRllc ₈	>1	$p < k$	$\sin \psi_k; \operatorname{ctg} \psi_k = (\gamma_k + k \theta) \operatorname{csc}^2 (\gamma_k + k \theta) -$ $-\operatorname{ctg}(\gamma_k + k \theta); \theta g_k - 1 = (\frac{\beta k}{\sin \beta k})^2 - \frac{2 \beta k}{\operatorname{tg} \beta k} -$ $-\theta^2 - (2\theta - \gamma_k) \gamma_k; \beta_k = \gamma_k + k \theta; \delta_{kp(k)} = \theta$	$E_0 = E_{0ax} - I_0 r_B; r_B = r \left\{ 1 - \frac{m \delta}{4 \pi} + \frac{m p}{2 \pi} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} \right\} [1 - \cos \frac{\delta}{2} \cos(\lambda + \beta +$ $+\frac{\delta}{2})]; p = \frac{1 + e^{-\delta \operatorname{ctg} \beta}}{\sin(\delta + \lambda) - \sin \lambda e^{-\delta \operatorname{ctg} \beta}}; \lambda = \omega t_1 - \beta - \frac{\pi}{m}; \omega t_1 \approx \frac{\pi}{m} -$ $-\frac{p}{2 \pi} \frac{R}{1 + \frac{r_B}{R}}; r_B \approx r \left(1 + \frac{m}{2 \pi} \operatorname{tg} \beta \right); \beta = \arctg \frac{\omega L_s}{r};$ $\frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left\{ \sqrt{\left[\frac{2 \pi (1 + \frac{r_B}{R})}{p R} \right]^2} - 1 \right\} [\sin(\gamma - \beta) + \sin \beta e^{-\delta \operatorname{ctg} \beta}] -$ $- [\cos(\gamma - \beta) - \cos \beta e^{-\delta \operatorname{ctg} \beta}] = 1 + e^{-\delta \operatorname{ctg} \beta}$	5 9 10
24	SmLRllc ₈	>1	$p < k_1$	$2 \sin \theta \cos(\psi + \theta)^* ; 2 \theta N^+ - \gamma = \cos \delta \sin(\delta +$ $+\psi + \theta) / \cos(\psi + \theta); \operatorname{tg} \psi = u/\beta; u = \cos \theta +$ $+ \cos \varphi_g \cos(\theta + \gamma - \varphi_B) - \sin \varphi_B \sin(\theta - \varphi_g) e^{-\delta \sigma_B};$ $\beta = \sin \theta + \cos \varphi_B \sin(\theta + \gamma - \varphi_B) + \sin \varphi_B \times$ $\times \cos(\theta - \varphi_B) e^{-\delta \sigma_B};$	$\operatorname{tg} \psi = \frac{1 + (\operatorname{tg} \theta - 2 \operatorname{tg} \delta_{kp(1)}) \operatorname{tg} \delta_{kp(1)}}{3 \operatorname{tg} \delta_{kp(1)} - \operatorname{tg} \theta}$	5 9 10
25	SmLRllc ₈	>1	$p < k$	$\sin k^* \theta \sin(\psi_k + k \theta) / \sin \theta - k^* \sin \psi_k^* ;$ $k \theta N_k = I_0(k) \sin k \theta \sin(\gamma_k + \psi_k^* + k \theta) (\cos \delta_k -$ $- I_k \sin \gamma_k) - (\theta - \delta_k / k^*); \operatorname{tg} \psi_{kp(k)} = [a_k \sin \delta_k \times$ $\times \cos(k \theta + \delta) + \theta \sin 2(\theta - \delta)] / [a_k + \sin \delta \times$ $\times \sin(k \theta + \delta) + \sin^2(\theta - \delta)]; \delta_k = \delta_{kp(k)};$ $a_k = \sin k^* \theta / k^* \sin \theta$	$I_d \frac{(1 + e^{-\frac{R}{x} \delta})}{2 I_m} = \sin[\gamma - (\alpha_1 + \varphi_k)] + \sin(\alpha_1 + \varphi_k) e^{-\frac{R}{x} \delta};$ $I_m = \frac{E_m}{2 \mathcal{E}}; \mathcal{E} = R + j x; \alpha_1 = \arcsin \frac{I_d R}{E_m}; \varphi_k = \arctg \frac{x}{R};$ $I_d(\varphi) = \frac{2 I_m \left\{ \sin[60^\circ - (\alpha_1 - \varphi_k)] + \sin(\alpha_1 + \varphi_k) e^{-1,05 R/x} \right\}}{1 + e^{-1,05 R/x}}$	5 9 11

Формулы тока I_0 и уравнения связи

№	Условия	Унифицированные соотношения	Унифицированные соотношения	№
26	$\delta = S_1 + S_2 + S_3 = 0$	$\cos \lambda - a \cos 3 \lambda$; $a = S_{a3} / S_{a1}$; $\pi \theta + \lambda - \psi_B =$ $[(\sin \lambda - \sin \psi_B - \frac{a}{3}(\sin 3 \lambda - \sin 3 \psi_B)) / (\cos \lambda - a \cos 3 \lambda)]$; $\cos \psi_B - a \cos 3 \psi_B = \cos \lambda - a \cos 3 \lambda$; $\lambda_{кр(\beta, 0)} = \theta$; $P < 3_B \rightarrow P < 3$; $3 \theta \lambda_{кр(\beta)} = (sc \lambda_{кр(\beta)} + 2) \sin \lambda_{кр(\beta)}$ $a_{кр(\beta)} = (1 - \cos \lambda_{кр(\beta)}) / (1 - \cos 3 \lambda_{кр(\beta)})$	$\frac{\rho U_0}{\pi r} \cdot \frac{\sum_{n=1}^n \alpha_n \cos \psi_n (\frac{1}{n} \sin n \theta - \theta \cos n \theta) + \theta \sum_{n=1}^n \alpha_n \sin \psi_n}{\sum_{n=1}^n \alpha_n \cos (\pi \theta + \psi_n)}$ $= \frac{\rho U_0}{\pi r} A_\alpha$; $A_\alpha = \frac{I_0 \pi r}{\rho U_0}$; $\alpha_n = U_{2 \max n} / U_{2 \max 1}$	6 10
27	$\delta = S_1 + S_2 + S_3 = 0$	$\sum_{\gamma} a_\gamma \cos (\gamma \lambda + \psi_\gamma)$; $a_\gamma = S_{a\gamma} / S_{a1}$; $\lambda_{кр(\theta)} = \theta$; $\pi \theta + \lambda = \sum_{\gamma} \frac{a_\gamma}{\gamma} \cos \psi_\gamma \sin \gamma \lambda / \sum_{\gamma} a_\gamma \cos (\psi_\gamma + \gamma \lambda)$	$\frac{m U_0}{\pi R} \frac{\sum_{n=1}^n \alpha_n \cos \psi_n (\frac{1}{n} \sin n \psi_1 - \psi_1 \cos n \psi_1) + \psi_1 \sum_{n=1}^n \alpha_n \sin \psi_n}{\sum_{n=1}^n \alpha_n \cos (n \psi_1 + \psi_n)}$ $= \frac{m U_0}{\pi R} A_\alpha$; $A_\alpha = \frac{I_0 \pi R}{m U_0} = \frac{\pi R}{m R_M}$; $\alpha_n = U_n / U_{2m}$	6 10

Примечание: 1-можно упростить; 2-неудачно выбрано начало координат; 3-неудачно выбраны основание для тока и отсчёт углов; 4-в "сыром" виде; 5-сложно; 6-очень сложно; 7-ошибочно (опечатки); 8-результат сомнителен; 9-неверно; 10-критичность состояний не обнаружена, условия критичности не найдены; 11-не получено замкнутое уравнение связи угла коммутации с параметрами схемных элементов; 12-не получено уравнение для θ ; 13-не получено уравнений для β и ψ (или θ); 14-уравнения для $I_s, \psi_1, \psi_2, \theta_1, \theta_2$ здесь опущены из-за громоздкости; 15-случай рассматривается, но I_0 не найдено; 16- I_0 не доопределено.

Универсальная структурная схема расчётов на ЭЦВМ





11.6.79

П р а в к а

о депонировании рукописи № 5920

Выдана настоящая гр. **РЕПИНУ А.М.**
(фамилия, имя, отчество автора)

в том, что **НИИЭИР**
(наименование органа информации)

депонирована в справочно-информационном фонде его рукопись **"Расчет
среднего тока полезной нагрузки вентильных
преобразователей"**.
(название рукописи)

Реферат настоящей рукописи опубликован в **РЖ серия:Общетех-
ническая № 7, 1979г. ВИМИ**
(наименование и номер реферативного издания)

В соответствии с Инструкцией о порядке депонирования рукописных работ по естественным, техническим и общественным наукам, утвержденной постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике, Президиума Академии наук СССР, Министерства высшего и среднего специального образования СССР и Главного управления по охране государственных тайн в печати при Совете Министров СССР от 14 мая 1971 г. № 157/13, авторы депонированных рукописей сохраняют права, вытекающие из законодательства об авторском праве, но не могут претендовать на выплату гонорара; депонированные рукописи приравниваются к опубликованным печатным изданиям.



Директор

[Handwritten signature] /Н.И. КУДИН/
11.06.79