

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



1974

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

5

*Да здравствует 1 Мая — День международной
солидарности трудящихся в борьбе против импери-
ализма, за мир, демократию и социализм!*

(Из Призывов ЦК КПСС к 1 Мая 1974 года)

УДК 621.311:518

Применение теории игр к проблемам электроснабжения

Проф. доктор-инженер МУШИК Э.
Высшая инженерная школа Циттау, ГДР

Технические проблемы решаются в результате накопления многосторонней информации о них, составления на основе этой информации модели действительности, определенной обработки этой модели и перенесения результатов обратно на оригинал. Математические структуры моделей не являются однозначными изображениями действительности. Они гомоморфно отображают действительность, и полной аналогии ожидать нельзя. Возможна такая идеализация проблемы, при которой достигается желаемая гомоморфность с существующей моделью. Это дает возможность выбирать математические модели не только по качеству отображения действительности, но и по возможности управления ими. При этом мы имеем дело уже не с самой технической проблемой и ее действительным техническим содержанием, а с идеализированной конструкцией, которая в большей или меньшей мере отличается от действительности. В допустимых пределах погрешности такой метод вполне обоснован и испытан. Но в настоящее время достаточно велика опасность, заключающаяся в пренебрежении качеством отображения действительности в пользу возможности управления. Это приводит к тому, что создается идеализированный мир моделей и находятся справедливые решения для недостаточно верных изображений проблем или, проще говоря, даются правильные ответы на неправильные вопросы.

Примерами сказанного является значительное число точных математических моделей в электроснабжении, которые из-за погрешностей исходных данных не дают удовлетворительных результатов.

Это обстоятельство вынуждает нас заниматься согласованием проблем моделей, если мы не хотим, чтобы разрыв моделей все увеличивался и польза от теоретических работ (при возрастающих затратах) снижалась, а также увеличивалась опасность неправильной ориентации при применении таких результатов.

Классы проблем и моделей. Область работы инженера требует от него решений, которые в дальнейшем назовем выбором альтернативы из множества E возможных альтернатив поведения или действий, для которого в общем случае имеет место и E . Решение получается с помощью модели проблемы. В этой модели важные для нахождения решения обстоятельства и связи — элементы модели и их связи — аналогичны (с точки зрения структуры и функции) элементам проблемы и их связям. Проблемы могут быть разделены на три класса: детерминистических проблем; стохастических или вероятностных проблем; стратегических или проблем с недостаточными информацией.

Детерминистические проблемы имеют заданные величины x_j , которые полностью известны и которые описывают множество обстоятельств и состояний нерешаемой проблемы. Между величинами x_j и результатами y_k имеется однозначное соответствие.

Множество результатов Y соответствует множеству возможных способов поведения или действий $\{E\}$, которые реализуют решение проблемы. Примером детерминистической проблемы из области электроэнергетики является выбор проводника

в сети при постоянно подключенных элементах. Заданные параметры описывают активные и пассивные элементы, например напряжение, как функцию времени для источников напряжения, вольт-амперные характеристики отдельных элементов и иногда неизменяющиеся значения тока и напряжения отдельных элементов электрической схемы. В качестве результата получают множество возможностей для выбора проводника:

$$Y = \{y_k\} \wedge y_k = \{y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn}\},$$

где y_{ki} — различные качества проводника (материал, сечение, скручивание и др.).

Из соответствующих y_k дискретных альтернатив действий (или поведений) E_i выбирается одна.

У стохастических или вероятностных проблем заданные величины x_j не полностью известны. Хотя бы один параметр x_j является случайной переменной. Между x_j и y_k имеется однозначное соответствие. Результаты можно проверить экспериментально при достаточно большом числе опытов.

Вышеописанный пример детерминистической проблемы становится стохастическим, если часть имеющихся в сети источников напряжения i работают только с вероятностью $0 < p_i < 1$. То же самое имеет место, если часть элементов временно отключена, но при этом известны вероятности включенного и отключенного состояния этих элементов. Число пассивных и активных элементов при этом не должно быть произвольно мало.

У стратегических проблем (с недостаточной информацией) параметры x_j частично неизвестны — хотя бы одна величина x_j задана таким образом, что вероятность состояний этой величины неизвестна. Между величинами x_j и результатами y_k не имеется жесткого соответствия. Результаты нельзя проверить.

Описанный выше пример становится стратегической проблемой или проблемой с недостаточными информацией, если выбор проводника производится по аварийному току, причем неизвестно, возникает ли вообще такой аварийный ток во время эксплуатации и неизвестно место предполагаемой в сети аварии и потому неизвестен и сам аварийный ток. Три названных класса проблем нельзя строго отделить друг от друга — различия имеют количественный характер. Детерминистические и стратегические проблемы можно рассматривать как специальные случаи стохастических проблем.

Для выбора альтернатив поведения (или действия) имеются мысленные модели поведения, которые можно разделять в соответствии с классами проблем на детерминистические, стохастические и стратегические модели.

Детерминистическими моделями являются такие, у которых выбор среди альтернатив может быть осуществлен при известных входных величинах и при достоверном результате решения. К этим моделям относятся все алгоритмы алгебры, дифференциального и интегрального исчисления, дифференциальных уравнений, вариационного исчисления, линейной и нелинейной оптимизации и др.

Стохастические модели предполагают, что выбор среди альтернатив может быть осуществим

при вероятностных входных величинах и результате решения в виде случайной величины. К таким моделям относятся алгоритмы теории вероятностей, стохастической линейной оптимизации и теории обслуживания.

Стратегическими моделями являются такие, у которых выбор альтернатив осуществим при неизвестных входных величинах и с недостоверным результатом решения. К этим моделям относятся алгоритмы теории игр.

Названные три класса моделей различаются по степени необходимости в информации. Они могут быть применены ко всем классам проблем, хотя и с различным качеством отображения. Целесообразность и применимость искомого решения требует разумного согласования моделей и решаемых проблем. Хотя стратегические модели более общие, чем стохастические, а последние, в свою очередь, более общие, чем детерминистические модели, они являются не заменой, а необходимым дополнением к первичным и знакомым структурам мышления.

Интерпретация проблем с недостаточной информацией, как ситуация конфликта между двумя партнерами. Детерминистические модели — в большом объеме и стохастические модели в возрастающей степени (особенно в последнее время) — находят применение в технике. Вместе с тем стратегические модели здесь применяются редко, а в электроснабжении почти совершенно не нашли применения.

На возможность применения теории игр в технике указано в [Л. 1 и 2], где показана допустимость интерпретации неопределенности, как ситуации конфликта. Именно в области электроснабжения часто придется принимать решения при некоторой неопределенности.

Неопределенность — это субъективная категория, которая обусловлена объективными или субъективными причинами или комбинацией этих причин. Она может быть обусловлена тем, что субъективные знания или уровень общественных знаний недостаточно охватывают объективные обстоятельства. Если уровень знаний может быть изменен при обоснованных затратах или может быть достигнут такой прогресс в знаниях, что достигается достоверность о рассматриваемых обстоятельствах и связях, то такой путь исключения неопределенности всегда является оправданным. Однако неопределенность может остаться несмотря на принципиальную возможность ее преодоления, если большие затраты практически исключают такой путь. С другой стороны, возможно, что неопределенность не может быть преодолена из-за недостатка времени для получения информации. Такие ситуации возникают при оперативном управлении энергосистемой. Наконец, неопределенности могут возникать и из-за объективных причин, например, случайных появлений некоторых состояний.

Если имеется неопределенность из-за объективных причин или она не может быть преодолена из-за больших затрат или из-за причин, связанных со временем, то известные детерминистические модели не дают решения для рационального поведения. Однако возможность для получения реше-

ния есть и при субъективно обусловленной неопределенности. Если ситуации интерпретировать как ситуации конфликта, то может быть применен математический аппарат теории игр для регулирования поведения. Ниже приводятся некоторые из основных понятий теории игр применительно к задачам электроснабжения.

Игрок. В теории игр под игроком понимаются реальные или фиктивные люди или группы людей, которые принимают участие в конфликте. В электроснабжении при принудительных решениях при неопределенности под игроком можно понимать природу, человека, завод, потребителя, производителя, конструктора, диспетчера и др.

Игра. Под стратегической игрой понимают упрощенную модель для ситуации конфликта участвующих игроков. Игра характеризуется любым числом людей или (чаще всего в технике) действий, сил, процессов и т. д., которым для их поведения дан определенный запас стратегий. По Ю. Нейману игра определяется совокупностью всех правил, которые описывают игру. В электроснабжении нас интересуют прежде всего игры, которые описываются математически.

Стратегия. В теории игр стратегия — это функция, которая на основе каждого множества информации игрока о ходе игры определяет решение о поведении игрока, т. е. план поведения игрока для всех возможных ситуаций игры. В электроснабжении можно интерпретировать области неопределенности и область реакций как запас стратегий двух игроков. Поясним это на следующем примере. Устройства грозозащиты должны быть выбраны для неполностью известных нагрузок. Неопределенность, каким будет ток в опасных ситуациях (максимальное значение, крутизна фронта), определяем как конфликтную ситуацию. Область неопределенности F есть множество всех возможных токов молнии до оцененного максимального значения F_n (F — запас стратегий игрока «природа»). Областью реакций E является множество всех возможностей поведения игрока «режим энергосистемы». Оно характеризует варианты для выбора устройства и является запасом стратегий игрока «режим энергосистемы».

Польза. Понятия польза, выигрыш, вред или убыль не определяются в теории игр, а определяются исходя из конкретной области применения. В электроснабжении это обычно выражается в денежных затратах, но может принимать и другие выражения, если ожидаются политические, социальные и эстетические последствия. Функция пользы e присваивает всем возможным комбинациям стратегий E_i, F_j определенную пользу, выигрыш, вред или убыток $e_{ij} = e(E_i, F_j)$. В зависимости от вида игры e_{ij} может быть математическим ожиданием случайной величины. Функция пользы имеет характерные значения, которые используются в описании игры [Л. 3].

Матрица игры. Матрицей игры является составленное в виде таблицы сопоставление пользы, получаемой игроком при применении возможных для него стратегий и предусматривании стратегий другого игрока. Такая таблица необходима для оценки игровых ситуаций:

	F_1	F_2	F_3	$\dots$	F_n
E_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}	$\dots$	e_{1n}
E_2	e_{21}	e_{22}			
E_3	e_{31}		e_{33}		
$\vdots$	$\vdots$			$\ddots$	
E_m	e_{m1}				e_{mn}

В упрощенном виде матрица выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ e_{m1} & & & e_{mn} \end{bmatrix} = \|e_{ij}\|.$$

Матрица с $m \leq n$ и $2 \leq m < \infty$, $1 \leq n < \infty$ представляет собой совокупность всех возможных последствий e_{ij} , выраженных в денежной форме, при реакции E_i на неопределенность, недостоверность или погрешность, описанные через F_j . Области стратегий E_i и F_j при этом могут быть бесконечными и непрерывными.

В электроснабжении обычно рассматривается игра двух партнеров, которые обладают таким свойством, что сумма выигрышей обоих партнеров дает нуль (так называемые игры с нулевыми суммами). Чаще всего ситуации неопределенности можно представить как игру с природой. При этом для хода расчетов неважно, выбирает ли игрок «природа» свои стратегии несознательно и не с целью принести вред партнеру.

Об обработке матрицы игры. Стратегическая проблема считается решенной, если можно выбрать из области реакций один (или несколько) способов поведения $E_i \in E$, для которого все e_j при заданных условиях игры предпочтительны перед остальными e_{ij} . Теория игры дает для этого несколько критериев оптимизации, которые основываются на различных аксиоматических системах. Ниже приводятся в кратком изложении важнейшие критерии. При этом всегда $i = 1(1)m$; $j = 1(1)n$.

Простой принцип минимакс. Предполагается, что ситуации неопределенности, представленные матрицей игры, возникают всего лишь один раз и вероятности появления этих F_j неизвестны. В таком случае для оптимальной стратегии имеет место

$$E_{\text{opt}} = \{E_i / E_i \in E \wedge \eta_e = \max_i \min_j e_{ij}\}.$$

Простой принцип минимакс гарантирует минимальную пользу (нижний предел) η_e , которая не зависит от того, какое появляется F_j .

Общий принцип минимакс. Если допускается, что ситуация неопределенности появляется несколько раз, т. е. что игра повторяется и этим

самым стратегии E_i и F_j выбираются с вероятностями p_i и q_j , то

$$\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_m)^T;$$

$$\bar{q} = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)^T,$$

причем

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1 \text{ и } \sum_{j=1}^n q_j = 1.$$

Решение этой проблемы в общем случае является оптимальной «смесью» стратегий $\bar{p}_{\text{опт}}$, которая следует из системы неравенств

$$\|e_{ij}\|x \geq 1 \wedge x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_m = \frac{1}{v}.$$

При этом

$$\bar{p} \frac{1}{v} = \bar{x} \|e_{ij}\| \bar{p} \geq \delta$$

и

$$v = \max_i \min_j e_{ij} = \min_j \max_i e_{ij}.$$

В среднем и для этого принципа гарантирован минимальный выигрыш при достаточно большом числе повторений.

Принцип Бейеса — Лапласа. Принцип Бейеса основан на известных вероятностях q_j . Оптимальной стратегией является

$$E_{\text{опт}} = \left\{ E_i / E_i \in E \wedge \sigma = \max_i \sigma_i \wedge \sigma_i = \sum_{j=1}^n q_j e_{ij} \right\}.$$

Выигрыш при оптимальной стратегии имеет определенный риск, его минимальная величина не гарантируется.

Общий принцип Гурвица. Цель принципа Гурвица — реализация высшего выигрыша, где для решения выбирается не минимум выигрыша, а взвешанное среднее из минимума и максимума. В технике есть примеры с известными данными для факторов взвешивания (C_1, C_2). В этом случае имеет место следующее равенство:

$$E_{\text{опт}} = \{ E_i / E_i \in E \wedge \eta = \max_i \eta_i \wedge \eta_i =$$

$$= C_1 \min_j e_{ij} + C_2 \max_j e_{ij} \wedge C_1 + C_2 = 1 \}.$$

Значение выигрыша η не гарантировано. Возможны его значения ниже этой величины.

Принцип Заважша. Принцип Заважша имеет целью минимизировать убытки. Матрица игры преобразуется в Регрет-матрицу $\|a_{ij}\|$. Оптимальная стратегия

$$E_{\text{опт}} = \{ E_i / E_i \in E \wedge \delta = \min_i \max_j a_{ij} \wedge a_{ij} =$$

$$= \max_j e_{ij} - e_{ij} \}.$$

Принцип Заважша утверждает, что возможная убыль при произвольных F_j не превосходит некоторое максимальное значение.

Метод решения по Вернеру. Исходя из желания сознательно допускать некоторый оценочный риск и в среднем обеспечить высшую прибыль, Вернер предложил новый критерий решения. Опти-

мальная стратегия выбирается из той области, для которой имеет место соотношение:

$$e_{ij} - \max_i \min_j \leq \varepsilon,$$

где ε — заданное значение меры допускаемого риска. Выбор критериев решения и тем самым выбор аксиоматической системы не полностью определен. Способ решения здесь имеет субъективный разброс. Однако нельзя переоценивать практическое значение этого выбора. В большинстве случаев несколько критериев решения дают один и тот же результат. В примерах из области электроснабжения, которые до сих рассматривались, результат не зависит от выбора аксиоматической системы. О применении критериев оптимизации с точки зрения области их применения писалось в [Л. 3 и 4].

Область применения стратегических моделей в электроснабжении. Нельзя привести полную классификацию применения теории игр в электроснабжении. Кроме того, всегда могут возникать непредвиденные решения. Самые важные потенциальные области применения стратегических моделей в рассмотренной области следующие: неопределенности спроса, неопределенности месторасположения, неопределенности нагрузки, неопределенности прочности, неопределенности процесса и другие неопределенности развития.

Остановимся более подробно на неопределенностях спроса, так как они имеют особое значение. Решения о развитии электрических сетей и станций принимаются на несколько лет вперед. Для этого в больших системах определяется спрос мощности, который находится из статистических значений нагрузки за прошедшие годы, рассчитывается функция прироста и эта функция экстраполируется на будущее. Уже на этом этапе возникают неопределенности: найденные статистические значения мощности рассеяны относительно расчетной кривой; на период экстраполяции ожидаются разбросы, которые будут не меньше разброса за базисный период; кроме того, может изменяться сама функция прироста.

Достоверность предсказаний обычно выше для больших систем и на более короткие интервалы времени. На рис. 1 показан разброс относительно кривой прироста большой объединенной сети ГДР в 1956—1970 гг. На рис. 2 показано отличие принимаемого потребления мощности для некоторых округов ГДР и для всей страны от наблюдаемых значений, что характеризует имеющуюся неопределенность спроса. Как показали исследования, для сети среднего напряжения этот график может проходить еще выше. Спрос мощности отдельного потребителя тоже может быть неопределенным. В системах электроснабжения часто возникает проблема проектирования снабжения потребителя через новое присоединение при еще точно неизвестной величине потребляемой мощности. Если для требуемой электрической мощности удастся найти верхний (S_0) и нижний пределы (S_u), то область $S_u, \dots, S_0$ можно рассматривать как запас стратегий партнера. Эту область можно подбором подходящих ступеней разделять на дискретные стра-

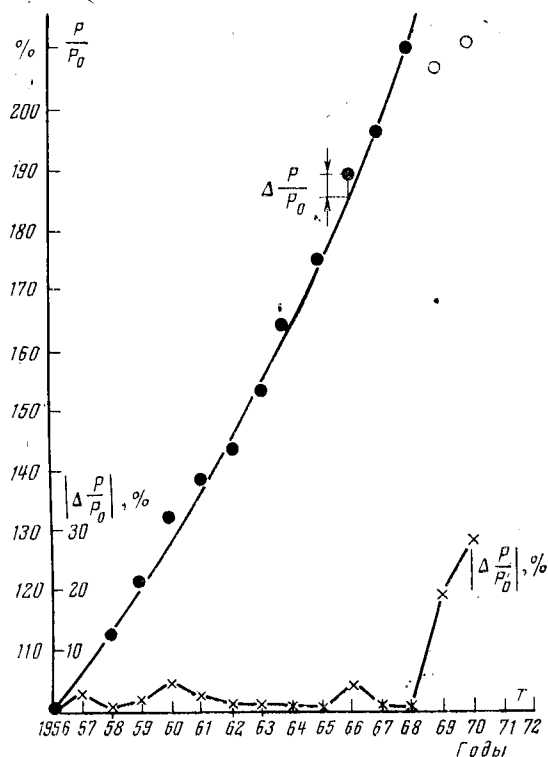


Рис. 1. Рост мощности большой объединенной сети по [Л. 5].
— кривая прироста мощности; ● — относительные значения мощности сети, соответствующие максимальной нагрузке в рабочий день декабря (по данным Главного диспетчерского управления, Берлин);
x — значения спроса мощности с учетом управления.

тегии

$$F_j = S_u + \sum_{l=1}^{l=j-1} \Delta S_l.$$

Ступени мощности ΔS_l согласуются с техническими данными, такими как нормированные мощности трансформаторов, пропускная способность кабелей и аналогичными, а также с требуемой точностью решения. Область реакций соответствует возможностям выбора линии

$$E_i = S_n + \sum_{k=1}^{k=i-1} \Delta S_k,$$

где S_n — наименьшая рассматриваемая мощность линии, $S_n \geq S_u$.

Для всех сочетаний E_i , F_j следует после этого подсчитать выигрыши e_{ij} . Они представляют денежные последствия (расходы) при различных определенных условиях, таких как недоотпуск продукции, расширение, новостройка и т. д. Полученная таким образом матрица игры обрабатывается в соответствии с названными критериями, в результате чего получают оптимальную стратегию, которая представляет наивыгоднейшую мощность линии.

Эта игра обычно неповторима, и невозможно определить вероятности F -стратегий. Особое значение здесь имеют пределы мощности S_u и S_0 . Обработка проблемы с помощью теории игр остается спекуляцией, если эти границы выбраны про-

извольно, а не как реальная возможность роста потребляемой мощности. Тогда становится очевидным лишь то, каким образом выбрать допущения, чтобы уменьшить величину возможных последствий. Если спрос группы потребителей неопределен, как это бывает в сетях среднего напряжения или в сетях 110 кВ, то может возникнуть другая ситуация. Здесь часто оказывается возможным оценить вероятности, и потому становятся менее значительными пределы изменений мощностей. Если не принимать во внимание вид критерия решения, то подход остается таким же, как он описан выше. В больших объединенных сетях, например в объединенной сети ГДР, существует несколько видов неопределенности спроса. Реакции на неопределенные отклонения от функции прироста отмечались в [Л. 5]. Игра эта неповторима. Таким же образом можно планировать мощность или энергию большой системы. Если сама функция прироста мощности не достоверна, возможные ежегодные значения прироста можно рассматривать как F -стратегии, а соответствующие им мероприятия в сети — как E -стратегии. И такая игра также неповторима. Наконец таким же образом можно анализировать возможные перерывы питания в больших системах энергоснабжения, а также необходимые резервы мощности электрических станций, которые в таком случае рассматриваются как неопределенности.

Неопределенности месторасположения часто возникают как дополнение к неопределенностям спроса. Возможно два разных случая: во-первых, может быть неопределенным выбираемое или разрешаемое месторасположение потребителя, подстанции, электрической станции или, во-вторых, может быть неопределенным то, которое из возможных месторасположений этих объектов более целесообразно. В первом случае E - и F -стратегии относятся к соответствующим месторасположениям. Во втором случае F -стратегии соответствуют

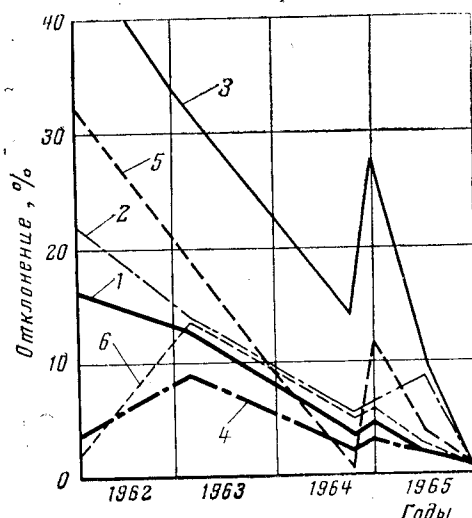


Рис. 2. Отличие предполагаемого потребления мощности для некоторых округов ГДР и для всей страны от наблюдаемых действительных значений по Грабе («Das Verbundnetz», 1967, № 9, 193 с.).

1 — ГДР; 2 — Потсдам; 3 — Франкфурт; 4 — Котбус; 5 — Магдебург; 6 — Галле.

позже заданным месторасположениям, а E -стратегии представляют возможные варианты месторасположения. В данных задачах игры неповторимы, а данные о вероятностях едва ли могут быть известны.

Неопределенности нагрузки в электроснабжении тоже играют большую роль. Нагрузка (использование мощности) не может быть полностью определена из-за состояний схемы сети о различных возмущений в сети. Особое экономическое значение имеют аварийные токи, прежде всего токи короткого замыкания. Электротехнические устройства проверяются по максимально возможным токам короткого замыкания, хотя эти максимальные значения возникают практически очень редко. Ожидаемые мощности короткого замыкания для практических рассматриваемых интервалов времени остаются неопределенными из-за неизвестного места повреждения, неизвестного момента времени коммутации и других влияющих факторов. Изоляция устройств нагружена частично неизвестными внутренними и внешними перенапряжениями. Токи молний, по которым выбираются заземляющие устройства, не заданы, а также не полностью известны нагрузки ветра и гололеда для воздушных линий электропередачи. Неопределенности прочности возникают из-за неполноты известных свойств материалов. Механические, термические, электрические и химические свойства прочности использованных в устройствах и аппаратах материалов частично имеют разброс. Длительная прочность часто не может быть определена, так как ее испытание невозможно. Частично неизвестны свойства прочности при комбинированных нагрузках. Отключающая способность крупных выключателей неопределенна, если не было возможности ее испытать. В оперативной службе диспетчера неопределенности процесса возникают в том случае, если требуется принимать решения при недостаточной информации о процессе, например после повреждений оборудования. При замыканиях на землю в сети или в генераторе требуется принимать решения

при неопределенности о частично неповрежденных устройствах и аппаратах. Состояние электросистемы может быть неясно при повреждениях во вторичных устройствах автоматики. Свойства надежности элементов системы также не полностью известны.

Ряд иных неопределенностей развития связан с известными проблемами прогнозирования. Первичная выработка энергии и ее распределение по местам потребления не полностью известны. Производится сравнение новых элементов систем, как, например, криогенных кабелей с обычными, хотя стоимости первых в ходе развития могут

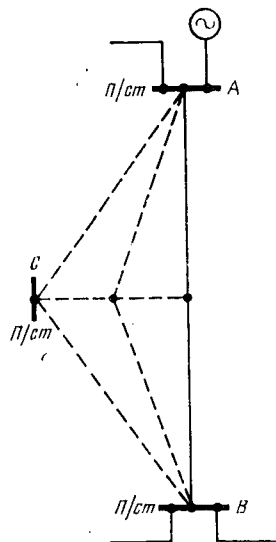


Рис. 3. Схема сети для примера (по Грабе).

Стратегии	Варианты трасс		
	А	С	В
E_1			
E_2			
E_3			
E_4			
E_5			
E_6			
E_7			

Рис. 4. Выбранные стратегии электрической сети.

сильно меняться. Могут изменяться и технические свойства. Решения о применении таких элементов требуется принимать в начальной стадии их разработки.

Имея в виду близость рассматриваемой области с проблемами снабжения газом и теплом, можно сделать вывод, что названные неопределенности имеются и в этих областях.

Названные типичные неопределенности показывают принципиальную область применения стратегических моделей, причем целесообразность их применения не обязательно определена априори. Применение может быть связано со слишком большими затратами, а может оказаться нецелесообразным и по другим причинам.

Примеры. В [Л. 6] исследована следующая простая практическая проблема с неопределенностью спроса. Пусть после сооружения крупной электростанции в ГДР необходимо построить линию электропередач 380 кВ длиной 250 км от пункта А до пункта В для передачи в первое время мощности $S_{AB}=600 \text{ Мв} \cdot \text{а}$ с $\cos \varphi=0,95$. При этом оказываются не полностью известными (по местным условиям) величина и направление потока мощности по линии АВ; считают, что в течение 10 лет может возникнуть разброс от -150 до $+100\%$. Кроме того, посередине расстояния между пунктами А и В, но в 50 км в сторону от линии (точка С на рис. 3) будет сооружаться подстанция 380 кВ, если минимальная нагрузка будет составлять 200 Мвт. Однако темпы роста мощности на этой территории неизвестны, следовательно, неизвестен и момент начала электропотребления в точке С. Задача состоит в том, чтобы при проектировании линий в районе АВС и при имеющейся неопределенности спроса отыскать наиболее выгодное для народного хозяйства решение. Ситуация неопределенности интерпретируется как игра двух партнеров. Один

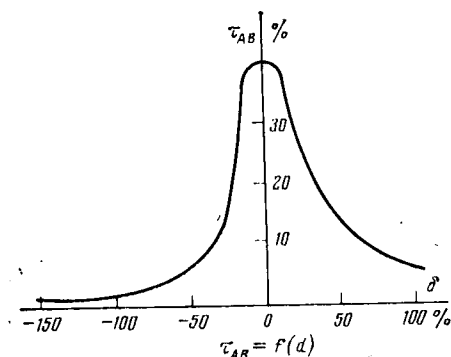


Рис. 5. Субъективная вероятность появления значений потока мощности по линии АВ в момент времени $t=10$ сек (по Грабе).

партнер располагает изображенным на рис. 4 запасом стратегий E для проектирования линии (при этом не рассматривались технически неразумные варианты). Другой партнер располагает запасом стратегий F -значения спроса, отнесенные к определенному времени (в пределах оцениваемого разброса). На рис. 5 и 6 F -стратегиям могут быть присвоены изображенные значения вероятности появления.

В элементы выигрыша e_{ij} вошли капиталовложения, убыток, затраты на обслуживание и текущие ремонты устройств. Не вошли в эту величину последствия для народного хозяйства, если в точке C нет электроснабжения, потому что эти величины неочислимы в настоящее время. Из-за этого выводы расчета будут ограниченными, но они останутся наилучшими для имеющейся информации. Принципиально, конечно, возможно включение и убыточных последствий. Матрица игры была обработана по принципу минимакс, по критерию Гурвица, критерию Заважша и по методу решения Вернера. Все критерии дали в качестве решения проблемы проект стратегии E_6 . Это решение не соответствует решениям инженера-проектировщика сети для таких случаев. Оно следует из того, что в условиях существующих цен в ГДР на решение очень сильно влияют капиталовложения. Другие соотношения цен влекут другие решения.

Особенно важный случай анализа проблемы с неопределенностью нагрузки был рассмотрен Стегеманом [Л. 7]. На одной из центральных подстан-

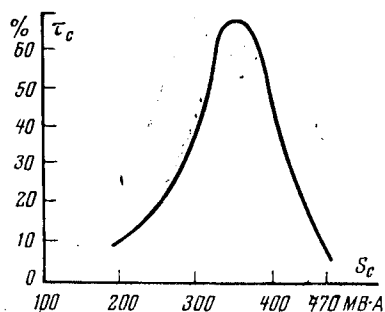


Рис. 6. Субъективная вероятность появления уровней нагрузки подстанции (по Грабе).

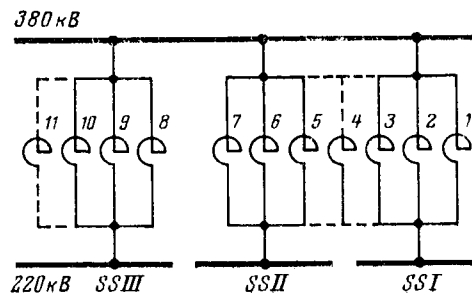


Рис. 7. Схема включения трансформаторов 380/220 кВ на центральной подстанции ГДР (по Стегеману).

ций ГДР эксплуатировались (рис. 7) трансформаторы 380/220 кВ, которые устойчивы к определенной мощности короткого замыкания. При развитии сети эта мощность короткого замыкания будет превышена в 1972—1973 гг. В соответствии с действующими до сих пор правилами следует либо ограничить нагрузку, либо заменить трансформаторы. И то и другое требует больших затрат, которые могут быть неоправданы, так как возможность короткого замыкания с максимальными мощностями мала.

В рассмотренном узле сети критическими являются только динамические последствия одно- и трехфазных коротких замыканий на стороне 220 кВ. На рис. 8 показаны зоны этих повреждений. На рис. 9 изображены вероятности появления:

- k коротких замыканий;
- не более k коротких замыканий;
- не менее k коротких замыканий.

В этом случае имеется неопределенность из-за объективного недостатка информации о требованиях производственных устройств, которую можно интерпретировать как конфликт между природой и предприятием, который является «источником» коротких замыканий. В качестве стратегий игрока «природа» из множества F разумно выбираются следующие, имеющие смысл:

- $F_1=0$ поврежд. за год, $q_1=0,082$;
- $F_2=1$ поврежд. за год, $q_2=0,205$;
- $F_3=2$ поврежд. за год, $q_3=0,256$;
- $F_4=3$ поврежд. за год, $q_4=0,214$;
- $F_5=4$ поврежд. за год, $q_5=0,134$;
- $F_6=5$ поврежд. за год, $q_6=0,067$;
- $F_7=6$ поврежд. за год, $q_7=0,029$,

где q_i — вероятности повреждений.

Случаи с большим числом повреждений чаще встречаются с пренебрегаемо малой вероятностью.

Из запаса стратегий E предприятия энергоснабжения выбирались разумные для данной игры аль-

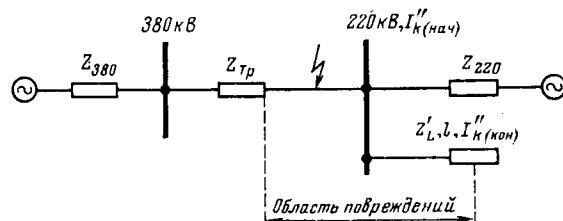


Рис. 8. Схема сети к примеру (по Стегеману).

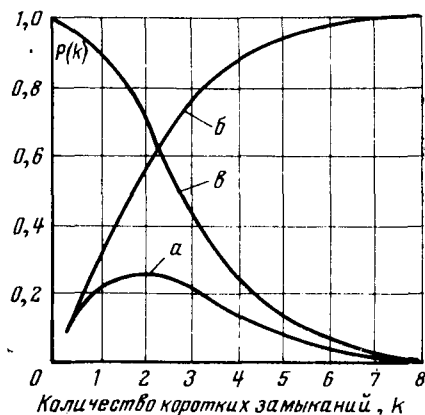


Рис. 9. Вероятность повреждений по Стегеману.

тернативы: с E_1 по E_4 — замена всех семи трансформаторов после 1, 2, 3 или 4 лет эксплуатации и с E_5 по E_7 — замена трех трансформаторов после 1, 2 или 3 лет эксплуатации. В элементы выигрыша e_{ij} входит стоимость приобретения новых трансформаторов, убыток от разрушений, транспортировка, монтаж, ввод в эксплуатацию, ущерб от недоотпуска энергии и возможные вспомогательные работы, отнесенные к моменту рассмотрения.

Обработка полученной таким образом матрицы по принципу минимакс, по принципу Гурвица и критерию Заважша давала в качестве оптимальной во всех случаях стратегию E_4 — замена трансформаторов после 3 лет эксплуатации. Это решение гарантирует предприятию энергоснабжения минимальный выигрыш — 9,4 млн. марок. Средняя ожидаемая прибыль определена в 23 млн. марок.

♦ ♦ ♦

Определение значений параметров сложной электрической сети, близких к оптимальным

Доктор техн. наук, проф. КАЯЛОВ Г. М., инж. МОЛОДЦОВ В. С.

Ростов-на-Дону

При проектировании новых или реконструкции существующих электрических сетей современных энергосистем обычно приходится определять оптимальные значения большого количества параметров сети для различных целевых функций. Решение подобных задач встречает значительные трудности, в основном ввиду отсутствия для целевых функций явных аналитических выражений, являющихся недоступными на данном этапе развития теории электрических сетей.

В этих условиях применение ЦВМ позволяет сравнительно легко находить численные значения целевых функций для отдельных комбинаций значений их параметров. Гораздо более сложной является задача разыскания той комбинации значений параметров системы, которая отвечает математическому минимуму данной целевой функции. Действительно, строгое решение этой оптимизаци-

Выводы. 1. Новые методы и способы анализа часто вызывают неоправданно большой восторг и ожидания. Этот восторг, основанный на недостаточном знании, может принести больший вред этому новому, чем естественное сопротивление его применению. Поэтому необходимо еще раз подчеркнуть, что стратегические модели не могут быть заменой детерминистическим и стохастическим методам, хотя этот метод дает возможности очень обобщенного анализа.

2. В большинстве областей применения новые методы лишь подтверждают обыкновенные практические способы. В других областях, сегодня еще не полностью известных, эти методы дают новые результаты и решения и являются поэтому только одним, хотя и необходимым, дополнением первичных структур мышления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Н. Н. Применение теории игр в технических науках. — «Техническое общество», 1969, № 6, с. 22—39.
2. Воробьев Н. Н. Применение теории игр в технических науках. — «Техническое общество», 1969, № 7, с. 32—38.
3. Kreul H. Spezielle Rechenverfahren der Spieltheorie. — «Elektrik», 1972, № 26, H. 3, S. 76—78.
4. Werner F.—J. Kriterien für Entscheidungen bei Ungewißheit in der Elektroenergieversorgung. — «Energietechnik», 1972, № 22, H. 10, S. 437—441.
5. Muschick E., Werner F.—J. Strategische Modelle für Bedarfsungewißheiten in der Elektroenergieversorgung. — «Die Technik», 1972, № 27, H. 8, S. 497—500.
6. Grabe G. Anwendung der Spieltheorie auf ein Trassenauswahlproblem bei ungewissem Leistungsfluß. — «Energietechnik», 1972, № 22, H. 10, S. 446—449.
7. Stegemann G. Entscheidungen zum Weiterbetrieb nicht kurzschlußfester Großtransformatoren. — «Energietechnik», 1972, № 22, H. 10, S. 442—445.

{13.3.1973}

УДК 621.311.001.24

ционной проблемы приводит к громоздким алгоритмам и программам для ЦВМ, широкое внедрение которых в практику проектирования и эксплуатации, как показывает опыт, встречает определенные затруднения.

Между тем теория и практика оптимизации показывают, что при выборе проектных решений весьма часто оказывается целесообразным несколько отходить от точки экстремума, выбирая решение, близкое к оптимальному. Основанием для такого подхода является тот факт, что целевые функции от многих параметров относительно медленно изменяются при изменении параметров в области, содержащей точку экстремума; с другой стороны, отступление от точки математического оптимума часто дает существенные преимущества в других отношениях. При этом эффективность принимаемого решения снижается несущественно —

подчас лишь в пределах возможной погрешности расчета. В качестве примера достаточно привести хотя бы практические рекомендации ПУЭ по выбору экономических сечений линий в разомкнутых электрических сетях.

Из всего сказанного можно заключить, что было бы неправильно заранее отвергать во всех случаях осмотнительное использование приближенных выражений для целевых функций с учетом их особенностей в различных задачах оптимизации, контролируя точные характеристики эффективности полученных приближенных решений. Не следует упускать из виду, что ввиду наличия операции дифференцирования любой приближенный метод расчета может приводить к значениям параметров, отличным от отвечающих точке строгого экстремума, хотя значение последнего может быть относительно весьма близким к найденному приближенному значению.

Основной результат настоящей статьи, служащий для реализации указанного подхода к проблеме оптимизации, но имеющий также и самостоятельное значение, заключается в обосновании двух простых приближенных формул — линейной и билинейной — для потерь активной мощности и энергии в сети в функции от ее параметров.

Приближенные аналитические выражения для потерь активной мощности в сложных сетях. Из числа возможных типов независимых параметров, от которых зависят потери мощности в сети, а следовательно, и различные целевые функции, далее рассматриваются следующие три: а) активные сопротивления ветвей r_j (или сечения f_j); б) нагрузки отдельных узлов сети — по активной P_j и реактивной Q_j мощности, или по току I_j ; в) коэффициенты трансформации k_j трансформаторов связи. В дальнейшем параметры любого типа обозначаются через x_j .

Определению потерь в электрических сетях посвящено большое число исследований. Сложность строгих аналитических выражений для потерь [Л. 1 и 2] затрудняет их анализ, и тем более — анализ различных целевых функций, в которые входят потери.

Для определения потерь активной мощности в сети в настоящей статье приняты следующие приближенные аналитические выражения:

а) линейное

$$\Delta P = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j; \quad (1)$$

б) билинейное

$$\Delta P = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{i < j}^{1, n} b_{ij} x_i x_j. \quad (2)$$

Эти выражения не только являются удобными простейшими формулами, но и допускают более глубокое обоснование [Л. 4]. В частности, более точная формула (2) связана с регрессионным анализом, причем билинейные члены отражают корреляционную связь влияния различных аргументов на потери в сети. С другой стороны, формулы (1)

и (2) могут быть получены из разложения недоступной функции ΔP и ряд Тейлора (или в ряд полиномов по Чебышеву — Вейерштрассу — Бернштейну). В связи с этим можно, в частности, рассматривать коэффициенты b_j как приближенные значения частных производных целевой функции; такое истолкование не упрощает разыскания этих коэффициентов, однако оно имеет очевидное важное практическое значение с позиций известного градиентного метода расчета [Л. 3].

Далее принят способ определения значений коэффициентов b_j и b_{ij} для любой заданной сети путем ее моделирования на ЦВМ с использованием метода экстремального планирования эксперимента [Л. 4].

Наличие выражений (1) и (2) для ΔP позволяет составлять приближенные явные выражения целевых функций для основных проектных и эксплуатационных задач по сложным сетям для независимых параметров всех трех типов — r_j , I_j и k_j .

Разумеется, в выражения (1) и (2), а равно и в выражение любой заданной целевой функции, могут входить не все характеризующие сеть параметры x_j всех типов, а лишь некоторая их часть; более того, в некоторых задачах не исключено рассмотрение нескольких вариантов целевой функции, зависящих каждый от своего комплекса параметров x_j .

Разыскание коэффициентов выражений (1) или (2), аппроксимирующих недоступное строгое выражение для потерь мощности ΔP , следует осуществлять по методу наименьших квадратов, исходя из системы уравнений, получаемых на модели сети согласно следующим этапам расчета, принятым авторами.

1. Моделирование сети может быть, как известно, осуществлено либо на физической модели, либо на ЦВМ. В настоящей работе был применен второй метод — использовалась ЦВМ типа БЭСМ-4М. При этом установившийся режим сети рассчитывался с учетом наличия на потребительских подстанциях трансформаторов с АРПН; это позволило принять, что нагрузки сети не зависят от первичного напряжения в ее узлах. Расчет потокораспределения и потерь активной мощности в сети осуществлялся по программе Института электродинамики АН УССР. Результаты этого расчета дают с большой точностью ожидаемые фактические значения потерь для любой комбинации значений параметров сети; они и были приняты за основу при оценке погрешности выражений (1) и (2), полученных для данной сети.

2. Для непосредственного определения искомых коэффициентов b_j и b_{ij} следует принять наиболее естественный здесь метод наименьших квадратов, согласно которому составляется известная система нормальных уравнений, получаемая из исходной.

Билинейные члены в формуле (2) заметно увеличивают число искомых коэффициентов b_{ij} ; однако эти члены оказываются необходимыми для точности формулы (2) лишь при малом числе параметров x_j (см. ниже). В этом частном случае объем вычислений может быть снижен применением метода оптимального планирования эксперимента [Л. 4].

Определение потерь электроэнергии в сети. Переходя к определению годовых потерь ω электроэнергии следует прежде всего подчеркнуть необходимость достаточно точного их расчета. В самом деле, нельзя упускать из виду, что во многих случаях, например при разыскании экономически оптимальной компенсации реактивных нагрузок в узлах сети, относительно малая доля снижения потерь электроэнергии в сети может приводить к достаточно большому абсолютному экономическому эффекту, оцениваемому по стоимостным показателям. Отсюда следует, что допускаемая погрешность в величине годовых потерь электроэнергии должна быть существенно меньшей, чем ожидаемая доля снижения этих потерь.

Обращаясь теперь к самой методике расчета потерь энергии ω , нетрудно заметить, что наиболее просто и естественно принять как надежную основу расчета формулы (1) и (2) для потерь мощности ΔP . В наиболее общем случае формулы (2) при наличии в правой части параметров x_j всех типов — r_j , I_j (или P_j , Q_j) и k_j , мы имеем в силу (1) и (2)

$$\Delta P(t) = b_0 + \sum b_j I_j(t) + \sum b_{ij} I_i(t) I_j(t). \quad (3)$$

Здесь b_0 — билинейная; b_j — линейные функции от неизменяющихся для данной сети во времени параметров r_j , k_j ; b_{ij} — постоянные величины. Отсюда тотчас следует, что для получения среднегодовых потерь мощности ΔP_c в сети достаточно подставить в правую часть (3) значения средних нагрузок I_{jc} узлов¹:

$$\Delta P_c = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt = b_0 + \sum b_j I_{jc} + \sum b_{ij} I_{ic} I_{jc}. \quad (4)$$

Тогда значение годовых потерь энергии в сети

$$\omega = \Delta P_c T = 8760 \Delta P_c. \quad (5)$$

Изложенный вывод формулы (4) показывает, что возможная погрешность формулы (5) не превышает наибольшей погрешности формулы (1) или (2), приемлемость которой обоснована в статье далее. В то же время формулы (4), (5) не только сводят к минимуму необходимую информацию о характере графиков нагрузки узлов сети, но и являются весьма надежными, поскольку исходят лишь из обычно известных с большой точностью расходов электроэнергии по отдельным узлам сети. Это обстоятельство на практике существенно повышает фактическую точность расчетов по указанным формулам, поскольку неточности необходимых исходных данных могут резко снижать точность самих расчетных формул.

Остается заметить, что отражаемая, в частности, формулой (4), обычная допустимость неучета

¹ Заметим, что в силу независимости нагрузок $I_i(t)$ и $I_j(t)$ двух различных узлов, математическое ожидание произведения $M[I_i(t)I_j(t)]$ равно $I_{ic}I_{jc}$. Лишь для каждой пары промывленных трехмемных графиков со среднесменными нагрузками, убывающими от первой смены к третьей, следует, очевидно, заменить в (4) член $b_{ij}I_{ic}I_{jc}$ на посменные слагаемые: $\frac{1}{3} b_{ij}(I'_{ic}I'_{jc} + I''_{ic}I''_{jc} + I'''_{ic}I'''_{jc})$.

при расчете потерь энергии формы реальных графиков нагрузки при тех же ее средних значениях все еще вызывает иногда субъективные сомнения, основанные на ошибочных, интуитивно завышенных оценках значения коэффициента формы графика нагрузки, т. е. отношения эффективной нагрузки, например по току I_0 к средней I_c :

$$G_\Phi = I_0/I_c.$$

Поэтому здесь уместно привести полученную в [Л. 5] формулу для верхнего предела величины G_Φ :

$$G_\Phi \leq G_{\Phi M} = \frac{1 + \alpha}{2\sqrt{\alpha}}, \quad (6)$$

справедливую для графика произвольной формы с отличным от нуля отношением $\alpha = I_m/I_M$ минимальной ординаты графика к максимальной. График зависимости (6), а также серия характерных графиков нагрузки со значениями их коэффициентов формы ([Л. 5], рис. 1—6, 1—7) наглядно показывают, как мало отличаются значения G_Φ от единицы, даже при небольших значениях α ; еще меньше они для реальных графиков с упорядоченной диаграммой, близкой к прямолинейной. Остается заметить, что значения G_Φ для нагрузок отдельных участков сложной сети еще ближе к единице, чем для нагрузок ее узлов.

Погрешности линейного и билинейного выражений для потерь активной мощности в сети. Математически строгая оценка верхнего предела погрешностей выражений (1) и (2) в практически возможном диапазоне изменения параметров x_j для всех возможных схем сетей в настоящее время столь же недоступна, как и точное аналитическое выражение для потерь в функции от тех же параметров. Вместе с тем отсутствие общего точного выражения для потерь в сети означает отсутствие эталона, необходимого для проверки верхнего предела погрешности выражений (1) и (2).

В этих условиях для обоснования достаточной точности последних были выполнены многочисленные сравнительные расчеты для ряда конкретных сетей с помощью формул (1) и (2) и контрольно с помощью ЦВМ. При этом комбинации значений параметров, для которых производилась проверка, отвечали точкам изображающей ΔP гиперповерхности, расположенным в зонах, отличных от зоны размещения точек, выбравшихся по методу оптимального планирования экспериментов и послуживших для вычисления коэффициентов b_j , b_{ij} .

Относительное значение погрешности определялась в каждом случае двояко, а именно по отношению к абсолютной погрешности: а) к соответственной фактической величине потерь в сети согласно расчету на ЦВМ; б) к разности между наибольшей и наименьшей величинами потерь, найденных для различных комбинаций значений параметров данной сети.

Исследование погрешности для формулы (1) на ЦВМ согласно выше описанному показало, что в расчетах для параметров $x_j = r_j$ ни в одном случае не удалось получить примера погрешности, большей чем 2,6% — по отношению к диапазону

изменения потерь, и 1,3% — по отношению ко всей величине потерь в сети. Наибольшие погрешности билинейного выражения (2) составили доли процента. При этом значения варьируемых параметров r_j соответствовали сечениям проводов линий электропередачи, практически применяемым при различных стандартных напряжениях сети.

Значения варьируемых параметров Q_j при принятых неизменных значениях активных мощностей в узлах сети выбирались из расчета изменения коэффициента мощности, на шинах 35 кВ и выше в диапазоне от 0,8 до 0,9.

Наибольшие погрешности для выражения (1) при этом составили соответственно 4,5 и 4%; погрешность билинейного выражения (2) составила, как и для параметра r_j , доли процента.

Для параметров k_j при варьировании их значений в пределах $\pm 5\%$ $k_{ном}$ можно рекомендовать линейное выражение для потерь (1) лишь при числе трансформаторов связи не менее шести, причем наибольшие зарегистрированные погрешности составили: 2,4% изменяющейся части и 0,5% суммарных потерь; при пяти и менее трансформаторах связи необходимо использовать билинейное выражение (2), погрешность которого имеет тот же порядок долей процента, что и для вышеассмотренных параметров.

Следует отметить, что при $x_j = r_j$ коэффициенты b_j и b_{ij} в выражениях (1) и (2) принимают только положительные значения, т. е. с увеличением величин активных сопротивлений потерь в сети возрастают. Для параметров же Q_j и k_j те же коэффициенты могут иметь как положительные, так и отрицательные значения.

Экспериментальные расчеты проводились для сетей с числом узлов от 2 до 29 и, кроме того, для одной сети со 102 узлами. При этом для сетей с малым числом узлов рассматривались варианты не только отдельного варьирования параметров типа r_j , Q_j или k_j , но также и совместного. Наибольшие погрешности получились для сети с наименьшим предельным числом узлов, равным двум; при увеличении числа узлов величины погрешностей быстро снижались.

Кроме описанных сравнительных расчетов был проведен дополнительный анализ, согласно которому была исследована простейшая замкнутая сеть, состоящая из двух узлов: 1) питания и 2) потребления, соединенных двумя параллельными линиями. При допущении, что напряжение на приемном конце неизменно, нетрудно получить общую точную формулу для потерь активной мощности, как функции двух независимых аргументов — активных сопротивлений ветвей. Для этой функции было получено разложение в ряд Тейлора; при этом вычисления членов этого разложения для различных значений параметров подтвердили быстрое убывание значений частных производных от функции потерь по активным сопротивлениям по мере повышения их порядка. Значения вторых и третьих производных отличаются от значений первых соответственно на один и два порядка.

Применение предложенного метода к определению значений параметров сложной сети, близких к оптимальным. Пусть требуется решить в общем

виде задачу выбора экономически оптимальных сечений проводов для ряда линий сложной сети с заданной конфигурацией.

С учетом формул (1) и (3) выражение для приведенных затрат примет вид:

$$Z = p \sum_{j=1}^n (\alpha_j + \beta_j f_j) l_j + cT \left(b_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\rho_j b_j l_j}{f_j} \right), \quad (7)$$

где $\alpha_j + \beta_j f_j$ — удельная стоимость j -й линии электропередачи, тыс. руб./км, сечением f_j , мм², и длиной l_j , км; T — годовое число часов работы сети, ч; c — расчетная стоимость потерь, тыс. руб./кВт·ч; ρ_j — удельное сопротивление, Ом·мм²/км; $p = p_0 + p_n$ — коэффициент суммарных отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание, учитывающий также значение нормативного коэффициента эффективности p_n ; выражение

$$b_0 + \sum \frac{\rho_j b_j l_j}{f_j} = \Delta P_c$$

получено из формулы (1) путем замены параметров r_j на $\rho_j \frac{l_j}{f_j}$.

Из выражения (7) путем решения системы

$$\frac{\partial Z}{\partial f_j} = 0 \text{ или } p \beta_j l_j -$$

$$- cT \rho_j \frac{b_j l_j}{f_j^2} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

получаются следующие формулы для экономически оптимальных сечений:

$$f_j = \sqrt{\frac{\rho_j c T b_j}{p \beta_j}} \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

Эти формулы представляют обобщение на случай сложной сети известной формулы для экономического сечения обычной радиальной линии. Переход от значений f_j , вычисленных по формулам (9), к стандартным сечениям при различных возможных ограничениях представляет задачу дискретного программирования и выходит за рамки настоящей статьи.

Как уже было указано ранее, только что приведенный пример решения относится к простейшим задачам. Более сложной является, например, задача экономически оптимальной компенсации реактивных нагрузок в сложной сети. Дело в том, что при малом оптимальном эффекте снижения потерь энергии в сети точность линейной формулы может оказаться недостаточной (как было выяснено выше). В этих случаях целесообразны другие расчетные алгоритмы использования формул (1) и (2), составляющие предмет другой работы авторов.

Пример. Для сети, представленной на рисунке, номинальные напряжения в узлах 1, 2 и 3 равны 500 кВ, в узлах 5 — 10, 19 — 330 кВ, а в остальных узлах — 220 кВ. Номинальное напряжение балансирующего узла 4 равно 750 кВ. Требуется найти три аналитические модели (1) для среднегодовых потерь мощности. При этом изменяемые параметры $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ представляют согласно рисунку: для первой модели — активные сопротивления r_j участков сети; для второй — реактивные нагрузки Q_j узлов; для третьей — коэффициенты трансформации k_j трансформаторов связи.

Основы информационной структуры комплекса программ для решения сетевых задач для ЭВМ третьего поколения

КИМЕЛЬМАН Л. Б., ЛОСЕВ С. Б., РОССОВСКИЙ Е. Л.

Москва

В связи с появлением в электроэнергетике ЭВМ третьего поколения возникает необходимость создания для них специального математического обеспечения, в том числе для решения группы сетевых задач, куда входят расчеты потокораспределения, динамической и статической устойчивости, электрических величин при коротких замыканиях и сложных повреждениях, параметров релейной защиты и автоматики и др. Главной особенностью современного этапа разработок в отличие от практически всех выполненных разработок для ЭВМ второго поколения является создание комплекса соответствующих программ. При этом получаются весьма большие выгоды для пользователя, связанные не только с упорядочением и устранением избыточности исходной информации для заданной сети и с упрощением управления программами, но также с возможностью использования в одних программах результатов других программ, минуя трудоемкий этап ручной переработки информации [Л. 1 и 2].

В рассматриваемом комплексе, например, результаты расчетов потокораспределения в основных режимах работы сети используются не только в программах устойчивости, но также при вычислении электрических величин (в последнем случае дополнительными подсчетами определяются значения э. д. с. генераторов в многочисленных подрежимах, в которых вычисляются токи и напряжения при коротких замыканиях с учетом слагающих нагрузки). Вычисленные электрические величины, в свою очередь, используются в программах, определяющих параметры релейной защиты и автоматики. Кроме того, программа по вычислению электрических величин содержит блок по расчету для схем отдельных последовательностей входных (и взаимных) сопротивлений, которые определяют шунты коротких замыканий в расчетах динамической устойчивости и т. д.

Комплексирование является целесообразным и с точки зрения трудозатрат на разработку задач, так как устраняет избыточность, свойственную автономным программам. Так, на машинах третьего поколения для связи с пользователями существует только символьный ввод — вывод данных. Появляющееся в связи с этим большое разнообразие форм представления числовой и другой информации, а также носителей и способов отображения

этой информации (перфокарты, перфолента, теле-таип, пишущие машинки, электронно-лучевые трубки и т. д.) резко усложняет задачу преобразования данных из внешней формы во внутреннюю и обратно и требует в своем развитии системы обслуживающих программ, работающих в режиме разделения времени. Создание этой системы может быть оправдано только для обслуживания целого комплекса задач. Для повышения эффективности программ целесообразно предусмотреть расчеты сопротивлений схем замещения отдельных последовательностей по первичным параметрам, т. е. по геометрии и марке проводов ЛЭП; по мощности и напряжению нагрузки; по типу генератора и трансформатора или по их мощности, напряжению, реактансу (о. е.) и т. д. Решение этой задачи рационально осуществлять с использованием специально создаваемой информационно справочной библиотеки (С-библиотеки), обслуживающей все программы комплекса. Напрашивается аналогичное решение и при создании эффективной программы, позволяющей обозначать узлы привычными именами (а не цифрами). В этом случае не происходит ухудшения характеристик основных исполнительных программ, так как они по-прежнему оперируют с индексами. Перекодировка имен, заданных пользователем, производится общесистемными программами ввода — вывода с использованием словаря имен, помещаемого в С-библиотеку.

Основная задача комплексирования состоит в разработке целого ряда соглашений между отдельными составными программами, обеспечивающих их внешнюю и внутреннюю информационную совместимость, т. е. в создании общей информационной структуры комплекса. Эта работа должна предшествовать созданию отдельных программ (во избежание необходимости переделки последних при трудозатратах, соизмеримых с разработкой новых программ) и связана с решением вопросов общей архитектуры комплекса и взаимодействия программ и данных, управления процессом выполнения расчетов, внешнего языка представления данных, внутреннего формата организации данных, преобразования данных из внешнего представления во внутреннее и обратно, организации данных для хранения во внешней памяти и обмена данными с внешней памятью.

2. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. М., «Энергия», 1969, 351 с.

3. Крумм Л. А. Градиентный метод оптимизации режима объединенных энергосистем. — «Электричество», 1963, № 5, с. 6—13.

4. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы

планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965. 338 с.

5. Электрические нагрузки промышленных предприятий, второе издание. М., «Энергия», 1971. 264 с. Авт.: С. Д. Волоб-ринский, Г. М. Каялов, П. И. Клейн, Б. С. Мешель.

[13.11.1973]

Основы архитектуры комплекса. Архитектура комплекса базируется на следующих основных положениях.

а) Четкое отделение обслуживающих программ, осуществляющих операции ввода—вывода, от основной части комплекса—т. е. от исполнительных программ. Это значительно упрощает задачу доработки комплекса для обеспечения его функционирования в отдельных вычислительных системах, характеризующихся несколько различными внешними устройствами и математическим обеспечением (операционной системой). При этом имеется в виду, что исполнительные программы окажутся не чувствительными к этим различиям; изменения необходимо будет внести локально—только в программы ввода—вывода. Кроме того, это необходимо для обеспечения возможности последующего развития комплекса.

б) Четкое отделение данных, описывающих сеть, от управляющих данных, определяющих изменения в сети, условия расчетов и форму выдачи результатов. При этом учитывается, что сетевые данные характеризуются большим объемом и являются консервативными, т. е. мало меняются, а управляющие данные, как правило, значительно меньше по объему и весьма мобильны, т. е. часто меняются. В соответствии с этим для одной сети образуется отдельный набор сетевых данных; кроме того, образуются наборы управляющих данных. Для хранения каждого набора данных на дисках отводится определенное место, называемое файлом. Совокупность файлов образует библиотеку данных.

Кроме файлов с сетевыми и управляющими данными¹, необходим рабочий файл для хранения информации, непосредственно используемый в расчете. Общий порядок использования этих файлов следующий. В соответствии с указаниями, имеющимися в управляющем файле, информация сетевого файла переписывается в рабочий. Для настройки сети на нужный расчетный режим корректируется информация в рабочем файле, после чего производится расчет, причем результаты помещаются в файл с управляющими данными. Такой цикл работы повторяется необходимое число раз.

После окончания расчетов управляющий файл целиком или частично может быть выдан на печать для анализа результатов. Таким образом, сетевые задачи, кроме внешнего уровня управления, имеют еще и свой внутренний уровень управления, вся информация для которого помещается в управляющий файл. Выбор же из библиотеки данных сетевого и управляющего файлов как и всегда определяется управляющими картами мониторингового потока.

в) Устранение избыточности перед выполнением расчетов. Как правило, имеется несоответствие между объемом задаваемой сети и тем объемом ее, который должен

детально учитываться для получения искомого результатов. Как правило, задание сети большого объема диктуется не расчетной необходимостью, а удобством одноразовой подготовки и отладки сетевых данных. Однако проведение расчетов в такой сети без предварительного эквивалентирования сопряжено с увеличением времени счета и усложнением программы. В связи с этим на первом этапе работы комплекса предусмотрено использование программы эквивалентирования, которая обеспечивает требуемую точность в задачах расчета токов короткого замыкания и параметров релейной защиты при учете линейных характеристик элементов сети.

Кроме указанной схемной избыточности, имеется еще и параметрическая избыточность, так как параметры сети, необходимые в одних задачах, не нужны для других. Устранение лишних параметров в отдельных задачах и возможный переход к другому способу организации данных, более приспособленному к выполнению расчетов, производится в специфических программах преобразования сетевых данных в расчетную форму. Наборы сетевых данных, полученных в результате таких преобразований, образуют Р-библиотеку. Отметим, что сначала устраняется схемная избыточность, а затем параметрическая.

г) Создание системы библиотек данных (рис. 1). Информационная структура комплекса содержит, помимо информационно-справочной С-библиотеки данные на входном (текстовом) уровне в И-библиотеке, данные, преобразованные в расчетную форму, т. е. в расчетные схемы в Р-библиотеке и данные на некотором уровне, промежуточном между последними в П-библиотеке, который можно считать центральным уровнем. При этом имеется в виду, что вся информация из И-библиотеки с помощью программ преобразования в машинную форму приводится к промежуточному уровню (П-библиотека); здесь же производятся расчеты сопоставлений схем замещения по первичным параметрам (с привлечением С-библиотеки). На уровне П-библиотеки производится разделение данных на сетевые и управляющие. Программы преобразования сетевых данных в расчетную форму связывают П-библиотеку с Р-библиотекой, причем исполнительные программы производят расчеты в сетях из Р-библиотеки по управляющим данным из П-библиотеки, а результирующая информация поступает в П-библиотеку. Кроме того, все информационное взаимодействие между программами комплекса осуществляется на уровне П-библиотеки, а общесистемная программа эквивалентирования преобразует сетевые данные из И-библиотеки и помещает в нее же полученные сети. Для выдачи результатов информация из П-библиотеки преобразуется в символьную форму и помещается в И-библиотеку, откуда при помощи системы обслуживающих программ она поступает в устройства отображения (ввода—вывода).

д) Управление процессом получения результатов. Эффективность использования ЭВМ зависит не только от математических основ решения задачи, но в большей степени от вида результатов, т. е. от формы их представления и ком-

¹ Целесообразно обеспечить совпадение структуры элементов этих управляющих данных со структурой соответствующих элементов в наборе сетевых данных.

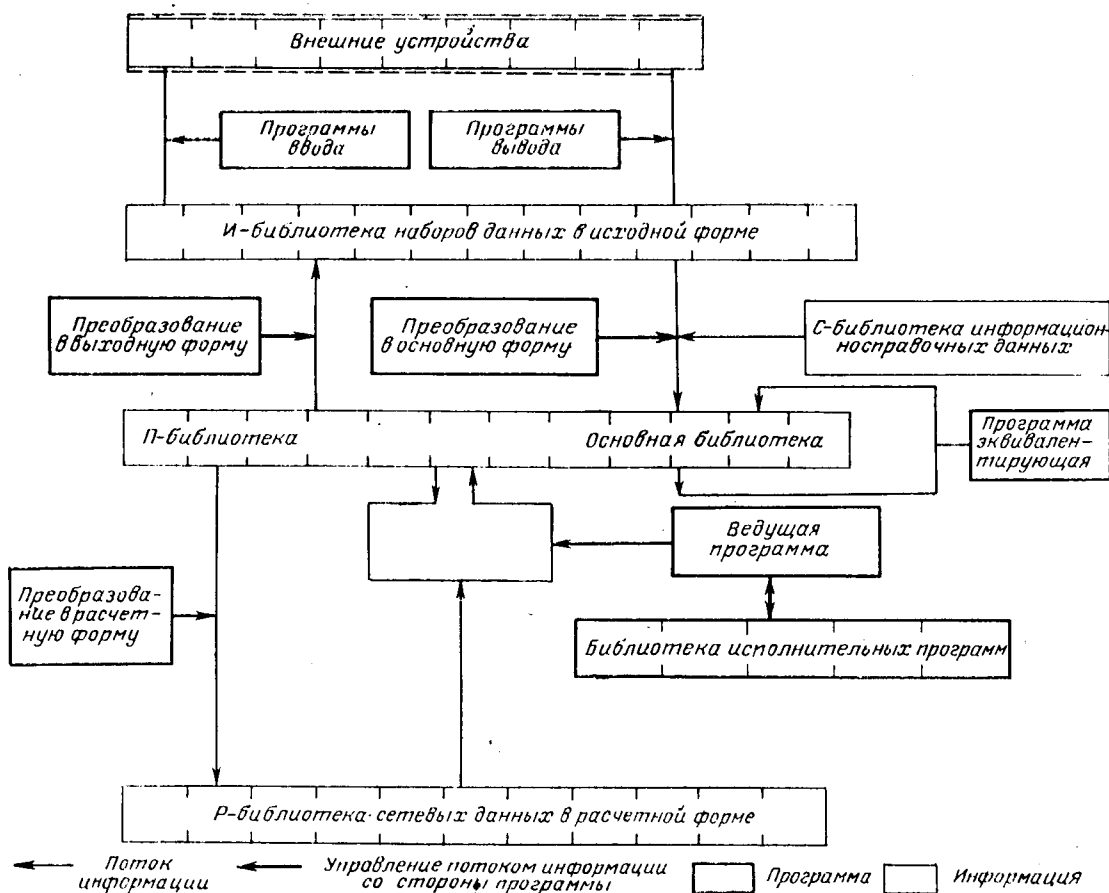


Рис. 1.

поновки. При этом форма представления и порядок следования результатов меняются от расчета к расчету.

Частично эта проблема может быть решена созданием нескольких модификаций программ, отличающихся разными форматами выдач, или созданием специальных программ по выборке и перегруппировке данных. Однако самым радикальным путем решения этой проблемы является переход к управляемому формированию результатов. В этом случае при разработке программ определяется форма представления только отдельных элементов результатов; общая же их компоновка производится по-разному в каждом расчете в соответствии с указаниями пользователя в управляющих данных. Необходимость организации внутри комплекса гибкого и разнообразного обмена информацией делает последнее решение единственно возможным².

Обмен информацией подразумевает запоминание результирующей информации одной программой для использования ее в других программах уже в качестве управляющей, т. е. запоминание

результатов должно происходить в файле с управляющими данными. Таким образом, управляющий файл не только определяет порядок проведения расчета, но и принимает в себя все его результаты. Эти вновь полученные данные управляющего файла могут быть выданы на устройства отображения и скорректированы пользователем, т. е. весь процесс обмена информацией может идти под наблюдением и с активным участием пользователя, что и является отличительной чертой комплекса. Выдача полученных результатов на печать при таком рассмотрении является частным случаем обмена.

Организация данных. Оптимальная организация данных является ключевой и вместе с тем сложной задачей из-за необходимости нахождения компромиссных решений, удовлетворяющих противоречивым требованиям. При этом имеется в виду, что внешняя форма представления данных должна быть удобна для пользователя, но должно обеспечиваться простое и быстрое преобразование их во внутреннюю (машинную) форму и обратно. Организация данных не должна зависеть от физических ограничений внешних устройств (например, от длины строки, размера страницы, емкости дорожки диска и т. д.) и должна оказаться пригодной для элементов информации резко переменной длины. Вместе с тем, внутренняя их организация должна быть компактной для эффективного использования

² Комплекс программ тем и отличается от комплексной программы, что в нем обмен информацией свободный и определяется пользователем в процессе эксплуатации, в то время как в комплексной программе все должно быть определено в процессе ее создания.

оперативной памяти. Кроме того, должна обеспечиваться простота программирования при введении новых типов данных по мере расширения круга решаемых задач. Должна предусматриваться и единообразная форма доступа к данным независимо от объема используемой памяти, что обеспечивает работоспособность комплекса в вычислительных системах различных типов. Наконец, учитывая специфику решения сетей большого объема, должна обеспечиваться возможность обработки крупных массивов информации в режиме обмена с дисками с минимальным количеством обращений к ним.

Вопрос об организации данных неразрывно связан с математическим методом решения сетевой задачи, т. е. системы линейных алгебраических уравнений. Наибольшее распространение в настоящее время получили метод образования матрицы узловых сопротивлений Z_y в системе уравнений

$$U_y = Z_y I_y \quad (1)$$

путем наращивания поочередно ветвей схемы [Л. 3 и 4], и метод Гаусса с оптимальным исключением узлов схемы при хранении только ненулевых элементов слабо заполненных матриц узловых проводимостей Y_y в системе уравнений [Л. 5 и 6]

$$I_y = Y_y U_y, \quad (2)$$

где $Z_y = Y_y^{-1}$ — квадратная матрица порядка p (p — количество узлов схемы); U_y и I_y — матрицы-столбцы узловых напряжений и токов порядка p соответственно.

Использование первого метода для расчета сетей даже средней сложности затруднительно из-за необходимости хранения элементов полностью заполненной матрицы Z_y , которые определяются количеством узлов p схемы во второй степени. Во втором методе объем данных пропорционален примерно p в первой степени. В связи с этим метод Гаусса положен в основу решения сетевой задачи. С функциональной точки зрения в первой части расчета по этому методу производится исключение поочередно $(p-1)$ узлов (в частности с активными элементами) при приведении схемы к результирующему двухполюснику, причем на каждом этапе осуществляется преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник. Во второй части получают напряжения узлов в обратной последовательности по отношению к порядку их исключения. В соответствии с этим задача линейного эквивалентирования, представляющая собой центральный элемент комплекса, решается как особый случай первой части расчета, т. е. при производстве исключения узлов только в эквивалентруемой части схемы. Это существенно упрощает алгоритм и подтверждает правильность использования метода Гаусса.

С информационной точки зрения в очередном этапе расчета используются данные, относящиеся к узлам исходной схемы, а также схем на отдельных этапах преобразования к результирующему двухполюснику. К этим данным относятся результирующая проводимость рассматриваемого узла, проводимости ветвей, присоединенных к нему, а также ток в соответствующем источнике. При

организации данных массивами с однотипной информацией на каждом этапе расчета используются один или несколько элементов данных. В связи с этим для простых схем, допускающих размещение всей используемой информации в оперативной памяти, можно организовать данные по массивам. Однако для сложных схем, при расчетах в которых оперативная память становится местом временного хранения отдельных массивов, такой способ организации данных связан с чрезмерно большим количеством обменов информации с внешней памятью, а потому нерационален. Поэтому в рассматриваемом комплексе, рассчитанном на сложные схемы, целесообразно использовать списковые структуры, содержащие разнородную информацию. При этом каждой ветви схемы соответствует свой список, содержащий номера узлов по концам ветви, сопротивление или проводимость ветви, а в случае активных ветвей — э. д. с. последовательно включенного источника или ток параллельно включенного источника, а также другие числовые и нечисловые параметры этой связи. Совокупность списков, соответствующих всем отходящим от узла ветвям, образует список куста. При этом в этапе расчета по исключению узла i или по определению его напряжения в оперативной памяти необходимо иметь список для этого же куста; в первом расчете дополнительно должны также присутствовать списки кустов, соответствующих узлам, смежным с i -м узлом в схеме с исключенными узлами $1, 2, \dots, i-1$. В этих списках записываются вновь появляющиеся ветви полного многоугольника, полученного при исключении центрального узла i многолучевой звезды. Наконец, для обеспечения по возможности меньших обменов информации с внешней памятью в задачах, использующих все три последовательности симметричных составляющих, вычисления производятся в очередном этапе сразу по всем трем схемам последовательностей.

Представляется, что концентрация в один список всей информации, относящейся к отдельному элементу сети, одновременно является наиболее удобной для пользователя формой. При этом внешняя форма организации данных будет соответствовать внутренней, что исключает необходимость производить перестроение данных при преобразовании входного текста.

Использование структуры из списков фиксированной длины для комплекса программ неприемлемо, так как состав информации будет расширяться. Кроме того, из-за большого разнообразия описания элементов сети потребуются применение списка большой длины, который для многих элементов будет слабо заполнен. Наконец, окажется невозможным устранение лишних параметров в отдельных задачах при преобразовании данных в расчетную форму. Использование структуры из списков переменной длины с произвольным следованием наименованных параметров, т. е. другой крайности, также нецелесообразно, так как все-таки имеются определенные связи между целым рядом параметров (например, между действительной и мнимой частями комплексной величины, между продольным сопротивлением и поперечной проводимостью линии и т. д.). В этом случае пришлось бы каждому

Список базисного комплекта предложений сетевых и управляющих данных

№ п/п.	Название предложения	Структура предложения
1	Начало фразы	<u>INDR INDEXI</u> 'сокращенное наименование'
2	Комментарий	<u>C</u> 'текст'
3	Конец фразы	<u>ENDR</u>
4	Индекс стяжного узла	<u>INDC INDEXK</u> 'сокращенное наименование'
5	Параметры линии	<u>LINE R1 X1 G1 B1 R0 X0 G0 B0</u>
6	Сопротивление ветви	<u>Z R1 X1 R2 X2 R0 X0</u>
7	Источник э. д. с.	<u>E E F</u>
8	Проводимость ветви	<u>Y G1 B1 G2 B2 G0 B0</u>
9	Источник тока	<u>I DI IMI</u>
10	Индексы ветви	<u>INDL INDEXI INDEXK</u> 'сокращенное наименование'
11	Активная часть сопротивлений взаимных индукций в J строке матрицы $Z_{ветви}^{(m)}$	<u>RM RJ1 RJ2...RJJ-1</u> $\times$ <u>RJJ+1...RJN</u>
12	Реактивная часть сопротивлений взаимных индукций в J строке матрицы $Z_{ветви}^{(m)}$	<u>XM XJ1 XJ2...XJJ-1</u> $\times$ <u>XJJ+1...XJN</u>
13	Наличие шиноразделительного выключателя, который в нормальных условиях включен	<u>WKL</u>
14	Ветвь для стороны трансформатора, соединенного в звезду, в кусте внешнего узла (I)	<u>TRYI R1 X1 n</u> φ <u>DR0 DX0</u>
15	То же, но в кусте внутреннего узла (K)	<u>TRYK R1 X1 n</u> φ <u>DR0 DX0</u>
16	Ветвь для стороны трансформатора, соединенного в треугольник, в кусте внешнего узла (I)	<u>TRGI R1 X1 n</u> φ <u>DR0 DX0</u>
17	То же, но в кусте внутреннего узла (K)	<u>TRGK R1 X1 n</u> φ <u>DR0 DX0</u>
18	Отключение элемента со стороны узлов I и K	<u>OPEN INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
19	Шунтирование элемента между узлами I и K	<u>SHUNT INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
20	Возврат элемента в исходное положение	<u>RETURN INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
21	Отключение элемента с заземлением его со стороны узла I	<u>OPGRI INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
22	Отключение элемента с заземлением его со стороны узла K	<u>OPGRK INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
23	Отключение элемента с заземлением его со стороны узла I и K	<u>OPGRIK INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
24	Отключение элемента только со стороны узла I	<u>OPENI INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
25	Отключение элемента только со стороны узла K	<u>OPENK INDEXI INDEXK</u> 'текст п.4'...
26	Поперечная несимметрия	<u>KZY RA RB RC RN Y</u>
27	Продольная несимметрия между узлами I и K	<u>PZIK RA RB RC</u>
28	Продольная несимметрия со стороны узла I	<u>PZI RA RB RC</u>
29	Продольная несимметрия со стороны узла K	<u>PZK RA RB RC</u>
30	Переход на новую страницу	<u>LIST INDEXR</u> 'текст'

№ п/п.	Наименование предложения	Структура предложения
31	Переход на новую строку	<u>STRING</u> <u>INDEXR</u> 'текст'
32	Вычисление электрических величин	<u>YRBL</u> 'текст' <u>VNAME</u>
33	Ссылка	<u>RFR</u> <u>INDEXR</u> 'текст'
34	Загрузка схемы для эквивалентирования	<u>LDEQ</u>
35	Сохраняемые узлы при эквивалентировании	<u>MRK</u> <u>INDEXI</u> <u>INDEXK</u> ...
36	Загрузка схемы для расчетов	<u>LDEX</u>
37	Преобразование исходных данных в расчетную форму	<u>CNFR</u>
38	Запуск расчетов, связанных с эквивалентированием	<u>EQU</u>
39	Запуск расчетов электрических величин	<u>EXEC</u>

параметру давать наименование, разрывая эти связи, а исполнительным программам восстанавливать эти связи на основании указанных наименований.

В связи с этим принимается промежуточный вариант, в котором имена даются группам связанных параметров, а в пределах одной группы существует жесткое позиционирование. Каждая группа имеет свою внешнюю (символьную) и внутреннюю (машинную) форму. При этом в символьной форме одна группа представлена в виде предложения входного языка; первое слово в нем — имя предложения (т. е. группы), а последующие слова — значения параметров (чаще всего десятичные числа). В машинной форме одна группа представлена в виде поля переменной длины; в первом полуслове записана его длина, а во втором — условный код, заменяющий имя. Далее идут параметры.

Каждое предложение входного языка начинается с новой строки. Соответствующие им машинные поля переменной длины komponуются вплотную. Набор предложений, относящийся к одному кусту схемы, составляет во входном языке фразу. Соответствующий набор машинных полей составляет одну запись файла. Совокупность фраз составляет набор данных. Указанные положения воплощены в приведенном ниже языке для одной из задач комплекса.

Входной язык для задачи расчета электрических величин при коротких замыканиях и сложных повреждениях. а) Сетевые данные. В таблице приведен список базисного комплекта предложений без использования первичных параметров сети для схем прямой, обратной и нулевой последовательностей. В каждом предложении слева имеется подчеркнутое служебное слово, определяющее тип предложения. Например, для предложения начала фразы (п. 1) служебное слово INDR пишется слева от текста. В предложениях пп. 2, 4 и 10 предусмотрена возможность записи любого поясняющего текста, который должен быть заключен между апострофами. Набор данных для сети из p узлов состо-

ит из такого же количества фраз, описывающих p кустов и специальных фраз, описывающих группы сопротивлений взаимодукций. Фразы в файле располагаются по возрастающим значениям индексов.

Начальное предложение фразы, описывающей куст (п. 1), содержит пятизначный индекс центрального узла куста, обозначенный INDEXI. Старшие три разряда индекса представляют собой буквы, а младшие два — десятичные цифры (например, INDEXI $\equiv$ ABC67). Каждая фраза кончается предложением, содержащим только одно служебное слово ENDR (п. 3).

Для описания одной ветви, присоединенной к центральному узлу «С» куста, используется группа из двух основных предложений, а если ветвь имеет активный элемент, — из трех основных предложений. Первое основное предложение описывает индекс смежного узла (п. 4). В нем после служебного слова INDC записывается пятизначный индекс INDEXK для узла K , смежного с центральным узлом куста I , например, INDEXK $\equiv$ ABC73. При этом INDEXI—INDEXK определяет ветвь схемы с узлами I — K (ABC67—ABC73).

Второе основное предложение содержит параметры связи между узлами INDEXI и INDEXK. Для линии передачи, учитываемой П-образной схемой и приведенной на рис. 2, используется предложение по п. 5, в котором $R1, X1$ — активное и реактивное сопротивления прямой последовательности продольной ветви схемы; $G1, B1$ — активная и реактивная проводимости прямой последовательности поперечной ветви схемы, присоединенной к цен-

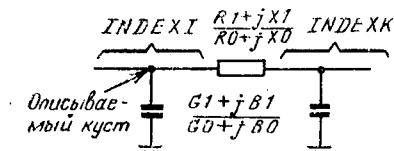


Рис. 2.

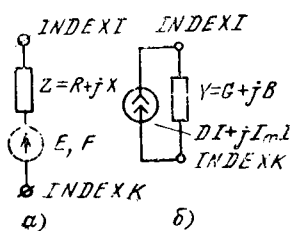


Рис. 3.

Если связь между узлами *INDEXI* и *INDEXK* представляет собой ветвь, то используется предложение по п. 6 или п. 8, при задании соответственно сопротивления или проводимости отдельных последовательностей (1, 2, 0). При наличии в ветви схемы прямой последовательности (рис. 3,а) последовательно включенной э. д. с. ее параметры задаются третьим основным предложением по п. 7, где *E* — модуль, а *F* — угол (в градусах) э. д. с. При наличии в схеме прямой последовательности источника тока, параллельного включенной ветви (рис. 3,б), его параметры задаются третьим основным предложением по п. 8. Для возможности вычисления натуральных токов и напряжений, т. е. без приведения элементов к одной ступени напряжения, необходимо в схемах замещения отдельных последовательностей учитывать трансформаторные связи.

В пп. 14÷17 приведен набор вторых основных предложений, позволяющих учитывать ветви трансформаторов. В них *R1*, *X1* — составляющие сопротивления ветви прямой последовательности; *n*, *φ* — модуль и угол комплексного коэффициента трансформации (*n*) в ветви прямой последовательности (в обратной последовательности автоматически учитывается $\hat{n}$, а в нулевой — *n*, т. е. $\varphi=0$); *DR0*, *DX0* — активная и реактивная составляющие дополнительного сопротивления нулевой последовательности, учитывающего, в частности, условия заземления нейтралей: $R0=R1+DR0$, $X0=X1+DX0$.

Каждая группа сопротивлений взаимной индукции задается специальной фразой, причем начальное предложение фразы содержит номер этой группы, например, для группы 17 *INDEXI*≡*ABC17*. Вслед за этим предложения индексов ветви (п. 10) чередуются с предложениями активных и реактивных частей сопротивлений взаимной индукции в одной строке квадратной матрицы сопротивлений электромагнитно связанных ветвей (пп. 11 и 12).

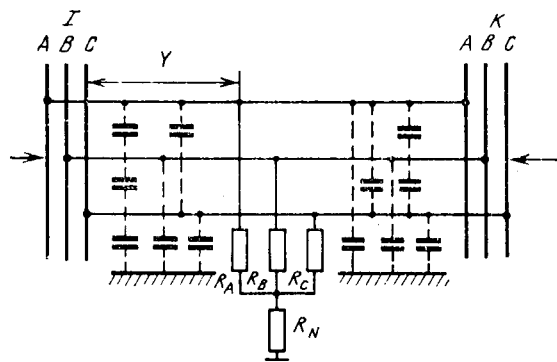


Рис. 4.

б) Управляющие данные. Для изменения параметров элементов при переходе к очередному режиму составляются группы из двух или трех основных предложений. В качестве первого основного предложения группы используется п. 10 (индексы ветви), где *INDEXI* и *INDEXK* определяют узлы по концам изменяемой связи. Второе и для активных ветвей третье основные предложения — так же как для сетевых данных.

Для внесения изменений во все три фазы схемы также можно использовать набор коммутационных предложений (пп. 18÷25), производящих действия над элементом, включенным между узлами *INDEXI* и *INDEXK*.

Для внесения несимметрий в сеть используются предложения пп. 26÷29, которые записываются вслед за индексным предложением п. 10. С использованием предложения поперечной несимметрии п. 26 можно задавать различные варианты короткого замыкания в точке «У» ветви *I—K* (рис. 4), расположенной электрически на расстоянии

$$Y = \frac{Z_{Y-I}}{Z_{I-K}}, \quad (0 \leq Y \leq 1)$$

от конца *I* ветви, причем выбором соответствующих значений для переходных сопротивлений *RA*, *RB*, *RC*, *RN* ($0 < R < \infty$) можно создать условия различных видов короткого замыкания.

При записи вслед за индексным предложением п. 10 предложения по пп. 28 и 29 создаются условия продольной несимметрии в ветви *I—K* со стороны узла *I* (рис. 5,а) и *K* соответственно, а при записи предложения п. 27 включаются активные сопротивления *RA*, *RB*, *RC* между узлами *I—K* (рис. 5,б).

Вычисление электрических величин при заданных расчетных условиях осуществляется с использованием предложения *VRBL* (п. 32), который функционирует совместно с предшествующим ему индексным предложением по п. 10. Предложение *VRBL* позволяет вычислять не только токи отдельных последовательностей, протекающие в ветви *INDEXI—INDEXK* (задаваемой в предшествующем индексном предложении), и напряжения отдельных последовательностей узла *INDEXI*, но и целый ряд сочетаний этих величин, для чего *VNAME* в п. 32 получает соответствующие наименования.

Указанные предложения должны быть дополнены предложением *STRING*, в котором указана

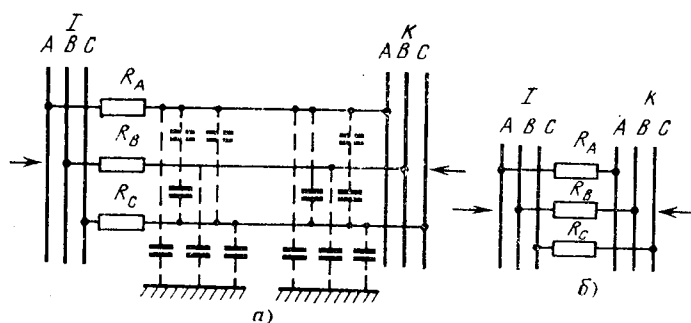


Рис. 5.

фраза управляющего файла, куда засылаются результаты вычислений. Задавая различные значения *INDEXR* в предложениях *STRING*, можно отдельные строки накапливать в разных фразах. Используя эту возможность, а также возможность составления любого текста в предложениях типа *VRBL*, можно формировать страницы с результатами любого формата с произвольными комментариями. Управляющие данные также содержат набор предложений (пп. 34–39), необходимых для загрузки и эквивалентирования схем, преобразования их в расчетную форму и запуска расчетов электрических величин.

Для минимизации объема управляющих данных используется предложение «ссылка» *RFR* (п. 33), которая функционирует аналогично приему обращения к подпрограммам. С помощью этого предложения можно обращаться в пределах файла к началу любой фразы с индексом *INDEXR*, записанным в самом предложении *RFR* с последующим возвратом к предложению после *RFR*.

Рассмотренные выше фразы имеют переменную длину, а потому в принципе могут превышать технические ограничения, связанные с размерами экрана ЭЛТ, страницей текста на АЦПУ или длиной дорожки на дисках. Для того, чтобы фраза оставалась смысловым элементом без ограничения длины, вводятся понятия «простая фраза» и «цепочка простых фраз».

Простая фраза в обычных условиях идентична используемой выше фразе и имеет предельный размер. Фраза большой длины состоит из цепочки простых фраз, причем вторая и последующие простые фразы имеют дополнительный номер, определяющий их место в цепочке. Индекс, входящий в начальное предложение этих фраз, содержит 8 символов, причем 6-й символ может быть '*', 'D' или 'E', а 7 и 8 символы отводятся за указанный выше номер простой фразы в цепочке. Символ '*' означает, что при печати данная простая фраза должна располагаться в начале новой страницы. Символ 'D' означает, что простая фраза должна печататься вплотную с предшествующей. Наконец, символ 'E' означает, что данная простая фраза начинает элементы многоугольника, полученного при эквивалентировании.

Аналогичные решения требуются для снятия ограничения на длину предложения. Для этого используется понятие «простое предложение». При этом под понятием «предложение» понимается цепочка подряд идущих простых предложений (в частном случае предложение трактуется как одно простое предложение). Простые предложения в цепочке, кроме начального, имеют в качестве служебного слова символ '*' или 'D'. При этом 'D' означает, что соответствующее предложение при выдаче на печать должно быть поставлено вслед за предшествующим на той же строке, а '*' означает, что данное предложение необходимо отображать на отдельной строке.

Внутренние форматы данных. Наряду с вопросом внешнего языка немаловажной является задача создания удобных внутренних форматов. Ниже приведена разработанная система внутренних форматов, соответствующих внешнему языку.

а) Служебное слово предложения имеет следующий вид:

байт	1	2	3, 4
	BS	L	SN,

где *BS* — признак состояния элемента (включен, отключен и т. д.); *L* — длина предложения (максимальная длина 255 байт); *SN* — условный номер предложения. Далее идет тело предложения, состоящее из машинных чисел с плавающей запятой нормальной длины (4 байта).

б) Служебная часть фразы. Набор предложений переменной длины (но не более 3600 байт) образует фразу, которая перед началом первого предложения типа *INDR* (п. 1) имеет служебную часть длиной в 16 байт:

байт	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	9, 10	11, 12	13, 14	15, 16
	LM	LR	NBLK	LBR	KC	KS	Ø	Ø

где *LM* — длина места в памяти, зарезервированного под фразу; *LR* — действительная длина фразы; *NBLK* — номер блока, где находится следующая в цепочке простая фраза; *LBR* — длина в блоке до начала этой фразы; *KC* — количество предложений типа *INDC* (п. 4) в данной фразе, т. е. количество смежных узлов в кусте; *KS* — количество предложений в данной фразе, т. е. количество строк.

Предложение *ENDR* (п. 3), завершающее фразу в машинном формате не хранится.

Фразы в соответствии с их длиной *LM* объединяются в блоки, которые являются единицей обмена с дисками. Длина одного блока не превышает 3600 байт. Каждый блок записывается на одну дорожку. Совокупность таких блоков, пронумерованных 1, 2, 3, ..., *N*, образует файл. В начале каждого блока имеется служебная часть длиной в 8 байт:

байты	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8
	LBLKR	NBLKR	NBLKRS	Ø

тело блока.

где *LBLKR* — длина блока; *NBLKR* — номер блока; *NBLKRS* — номер блока с продолжением информации.

Положение каждой фразы в файле определяется номером блока и длиной в этом блоке до начала искомой фразы. Эта информация, дополненная другими данными, сосредотачивается в блоки каталога, имеющие отличную от остальных блоков организацию. Первый блок файла всегда является блоком каталога. В служебной части блока каталога указывается номер блока, содержащего продолжение каталога. Каждая фраза, т. е. цепочка простых фраз, представлена в каталоге одной строкой. Для объединения элементов в цепочку используются поля *NBLK* и *LBR* в служебных частях простых фраз.

В служебной части предложения для опознания последнего хранится порядковый номер *SN*, соответствующий номеру предложения в таблице служебных слов. В дальнейшем анализ предложений ведется после замены этого номера с помощью таблицы перекодировки на специальный внутренний код, присвоенный данному виду предложений. Такая развязка внутренних кодов от их внешнего языкового представления внесена для того, чтобы максимально упростить задачу расширения языка и пересмотра начертаний служебных слов и свести

ее к смене таблицы. Использование элементов синтаксического управления необходимо в условиях расширяющегося комплекса и обязательно для каждой программы в нем работающей, т. е. при разработке отдельных программ недопустимо вводить в них непосредственный анализ тех или иных служебных слов входного языка.

После образования на дисках библиотеки, содержащей различные расчетные схемы, планируется использование такого метода доступа к дискам, как *ISAM* (индексный последовательный адресный метод). Для этого поле индекса фраз построено таким образом, чтобы оно могло быть использовано в качестве ключа для *ISAM* [Л. 7 и 8].

В соответствии с приведенной информационной структурой в настоящее время уже реализованы на ЦВМ третьего поколения, имеющей дисковую операционную систему, с использованием алгоритмического языка Ассемблера целый ряд общесистемных блоков, в том числе: блок ввода сетевых данных с перфокарт, их преобразования в машинную форму и записи на диски; блок чтения информации с дисков; обратного преобразования в текстовую форму и печать на АЦПУ; блок слияния двух дисковых файлов в один; блок чтения фраз с дисков и их перезапись в режиме динамического обмена; блок линейного эквивалентирования сетей неограниченного объема; ведущая исполнительная программа и другие.

Выводы. 1. Рассмотрение вопросов создания комплекса сетевых задач показывает, что основой создания такого комплекса является унификация данных, используемых отдельными программами.

2. Приведенная общая информационная структура комплекса применительно к ЭВМ 3-го поколения

может использовать магнитные диски для хранения больших массивов информации.

3. Входной язык, разработанный в соответствии с предложенными общими принципами построения информации, может применяться при создании алгоритмов и соответствующих им программ на языке Ассемблера по эквивалентированию сетей неограниченного объема в режиме динамического обмена с дисками, а также программы загрузки исходных данных и печати результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаханов В. С. и др. Принципы построения и элементы математического обеспечения многоуровневой системы диспетчерского управления энергообъединением. — В кн.: Применение вычислительной техники в электроэнергетике. Материалы конференции, сб. 2. М., 1970.
2. Цукерник Л. В., Баранов Г. Л., Мартыненко Я. Г. Моделирование энергосистемы в памяти ЦВМ с программно-диспетчерской автоматизацией расчетов (комплекс КМПД). Изд. АН УССР, Препринт-12, Киев, 1970.
3. Brown H. E., Person C. E., Kirchmayer L. K., Stagg G. W. Digital Calculation of 3-Phase Short Circuits by Matrix Method. — «IEEE Trans. on PAS», 1961, № 52.
4. Жидких Н. М., Лосев С. Б. Алгоритм и универсальная программа для комплексного расчета на ЭЦВМ «Урал-2» всех видов к. з. в сложных сетях. — «Электричество», 1967, № 5.
5. Sato N., Tinney W. F. Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix. — «IEEE Trans. on PAS», Dec. 1963.
6. Жидких Н. М., Лосев С. Б. Метод расчета на ЭЦВМ токов к. з., эффективно использующий матрицу узловых проводимостей. — «Электричество», 1968, № 11.
7. Под редакцией Штаркмана В. С. Вычислительная система IBM/360. Принципы работы. М., «Советское радио», 1969.
8. Джермейн К. Программирование на IBM/360. «Мир», 1971.

[12.7.1973]



О критике теории статической устойчивости энергосистем¹

Доктор техн. наук ЦУКЕРНИК Л. В.

Киев

Исследование проблемы статической устойчивости сложных многомашинных систем электроэнергетических систем развернулось в СССР около 40 лет тому назад. Основные исследования принципиального характера основывались на методах теоретической механики (теории колебаний), согласующихся с общей теорией устойчивости Ляпунова, в частности с его методом первого приближения для анализа устойчивости в малом нелинейных систем по их линеаризованной модели. В этих основополагающих исследованиях были сформулированы исходные математические описания элементов и связей энергосистемы, позволяющие получать уравнения возмущенного (в смысле Ляпунова) движения системы, учитывавшие в общем случае достаточно полно влияние моментов, связанных с малыми отклонениями скорости машин (отклонения от

синхронной скорости проверяемого на устойчивость режима невозмущенного движения) — это было изложено в работах Жданова П. С. [Л. 1 и 2], Марковича И. М. [Л. 3 и 4], Совалова С. А. [Л. 3], — и моментов, связанных с электромагнитными переходными процессами в электрических машинах, что было освещено в работах Лебедева С. А. [Л. 5], Горева А. А. [Л. 7 и 8], Ботвинника М. М. [Л. 9].

Было также совершенно очевидно, что для практических расчетов устойчивости сложных энергосистем, когда еще не было возможностей, открытых современной вычислительной техникой, необходимо было прибегать к упрощениям строгого математического описания задачи. В противном случае практические расчеты были явно невыполнимы, что подтверждалось проведением их для примерных схем с двумя синхронными машинами. При этом, сознательно прибегая к идеализации задачи и вводя упрощающие предпосылки в конкретные мето-

¹ В порядке обсуждения.

ды расчета (полное или частичное пренебрежение моментами, зависящими от скорости, пренебрежение электромагнитным переходным процессом в цепи статора синхронных машин и волновым процессом в линиях электропередачи, упрощение расчетных схем замещения и т. п.), авторы этих методов расчета могли оценивать допустимость упрощений лишь ориентировочно на основании качественных рассуждений и недостаточных по надежности и полноте примерных расчетов. Одновременно указанные выше ученые, а также Щедрин Н. Н. [Л. 10], Веников В. А. [Л. 11], Мамиконянц Л. Г. [Л. 12] и др. отмечали желательность более обоснованной количественной оценки допустимости пренебрежения различными моментами, зависящими от скорости машин, и других упрощений практических методов расчета.

Такая количественная оценка стала реально выполнимой лишь при помощи современных ЦВМ. С этой целью в нескольких организациях СССР на протяжении последних лет разрабатывались алгоритмы и программы анализа на ЦВМ статической устойчивости сложных энергосистем (в первую очередь в отношении аperiodической или квазиaperiodической [Л. 15] устойчивости). Наиболее полно моменты, зависящие от скорости, учтены в программе Ленинградского политехнического института [Л. 13 и 17], упрощенно — в программах ИЭД АН УССР [Л. 14 и 15]. Программы аналогичного назначения разрабатываются в ЭНИН, ВНИИЭ, МЭИ [Л. 16]. Подобные программы имеются также в других странах, и опыт их разработки и исследования отражен в докладах международной конференции по вычислительным методам для исследования электроэнергетических систем (Power Systems Computation Conference — Рим, 1969 и Гренобль, 1972).

Можно с уверенностью утверждать, что на основе исследовательских и практических расчетов на ЦВМ будет получена достаточно полная и обоснованная количественная оценка допустимости различных упрощающих предпосылок при расчетах статической устойчивости энергосистем. Весьма важным является то обстоятельство, что эта оценка относится к определению запаса устойчивости, соответствующего достаточно реальным условиям утяжеления режимов энергосистем, что ранее было невыполнимо. Совершенно очевидно, что для системы, находящейся вблизи предела устойчивости, расчет, учитывающий даже весьма слабые влияния малых параметров, может привести к неправильному представлению существенности учета этих параметров: при их учете система в результате расчета может оцениваться как устойчивая; при пренебрежении ими — как неустойчивая, или наоборот. Между тем запас устойчивости, имеющий, например, значение около 10% по утяжеляемому параметру режима системы, при этом практически может не изменяться.

Наряду с кратко охарактеризованной выше большой работой, проводимой, как нам представляется, на общем теоретическом фундаменте, но уточняющей с помощью ЦВМ количественные оценки целесообразности различных предпосылок в практических методах расчета, в последнее время

появились публикации [Л. 18—21], имеющие отличный от предыдущих работ характер.

В статье с подзаголовком «Критика современной теории устойчивости» делается заключение [Л. 21]²: «Современная теория статической устойчивости сложных энергосистем, не учитывающая функциональной зависимости моментов машин от угловой скорости, принципиально ошибочна... Аналитической основой теории являются некорректно упрощенные уравнения Парка—Горева. Они породили принципиально ошибочные общие взгляды на проблему устойчивости свободных систем, характеризующиеся недопустимым отрывом проблемы устойчивости от относительного движения машин от проблемы устойчивости их абсолютного движения». Далее: «Для практических расчетов современная теория устойчивости непригодна и в силу своей принципиальной ошибочности не может быть предметом преподавания в вузах». Аналогичные утверждения имелись и в первой публикации того же автора [Л. 18]. Одновременно автор Костюк О. М. претендует на фундаментальную новизну излагаемой им теории [Л. 21]: «Линии электропередач, трансформаторы, обмотки статоров синхронных генераторов и в особенности потребители электроэнергии сложной энергосистемы практически невозможно описать уравнениями динамики. Но для задач статической устойчивости в этом нет никакой надобности. Колебания вращающихся масс больших машин характеризуются очень низкой частотой (0,5—1,0 гц). При таких колебаниях электромагнитные процессы в электрической сети переменного тока промышленной частоты являются квазистационарными, и следовательно, их можно приближенно описать несравненно более простыми уравнениями статики. Но каковы они — уравнения статики — для линий передач и обмоток статоров синхронных машин? Оказывается, что ответ именно на этот на первый взгляд совсем простой вопрос имеет решающее значение для формирования правильных основ теории устойчивости энергетических систем.

Современная теория устойчивости, развитие которой непосредственно связано с работами таких известных ученых, как Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н., Горов А. А., Лебедев С. А., Жданов П. С., Брук И. С., Маркович И. М., Савалов С. А., Щедрин Н. Н., Веников В. А. (называется еще 11 имен. — Л. Ц.) и многих других, к сожалению, не смогла правильно решить этот вопрос. Утверждаемые ею взгляды вступают в принципиальное противоречие с классическими положениями теоретической механики, общей теории автоматического регулирования и даже с простыми физическими представлениями о свойствах динамических систем. Автор пришел к этим выводам после детального ознакомления с математическими основами современной теории статической устойчивости энергосистем». И далее [Л. 21]: «Автором предложен эффективный метод, основывающийся на использовании для аналитического описания электрических цепей переменного тока общих уравнений стационарных, синхронных и асинхронных режимов».

² Здесь и далее цитаты даются в переводе с украинского языка на русский.

Внимательное ознакомление с опубликованными работами Костюка О. М., в которых он пытается обосновать приведенное выше в цитатах и в ряде подобных заявлений опровержение современной (Костюк О. М., очевидно, имеет при этом в виду, судя по ссылкам, период от 1932 г. до наших дней) теории статической устойчивости энергосистем и свои претензии на создание новой теории, приводит к следующим замечаниям и выводам.

Основное критическое утверждение Костюка О. М., содержащееся в его первой публикации [Л. 18], что в уравнениях динамики энергосистемы при строгой их формулировке должны учитываться моменты, зависящие от изменения скорости вращения машин, не содержит ничего нового. Соответствующие уравнения имеются в работе Жданова П. С., критиковавшейся в [Л. 18], и О. М. Костюк был вынужден это признать, указав: «Следует отметить, что в работе [Л. 2]³ изложена более общая и правильная (разрядка наша. — Л. Ц.) схема решения задачи колебаний двух синхронных машин. Однако полученные здесь результаты не могут быть непосредственно использованы для практических расчетов. Может быть этим объясняется то обстоятельство, что автор (П. С. Жданов) ошибочно увидел в этих результатах подтверждение правильности уравнения (1). Ниже предлагается решение задачи...».

Речь идет об уравнении:

$$\frac{d^2\Delta\delta_{12}}{dt^2} + \left(\frac{1}{T_{J_1}} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} + \frac{1}{T_{J_2}} \frac{dP_2}{d\delta_{12}} \right) \Delta\delta_{12} = 0. \quad (1)$$

Таким образом, Костюк О. М., во-первых, делает странное предположение, что Жданов П. С. «ошибочно увидел» противоположное тому, о чем Жданов П. С. достаточно ясно писал [Л. 2], что уравнение (1) является приближенным, так как более строгая («правильная») теория требует учета изменений скорости; во-вторых, Жданов П. С. рассматривает не только случай «двух синхронных машин», но там же приводит критерий устойчивости для системы с неограниченным количеством синхронных машин, о чем Костюк О. М. умалчивает, утверждая, что результаты Жданова П. С. вообще не могут быть непосредственно использованы для практических расчетов. Этим Костюк О. М. создает представление у читателей своей статьи, что Жданов П. С. не делал практических расчетов, и в этом «может быть» причина его ошибки (как мы уже указали, мнимой). Но Жданов П. С. [Л. 2] приводит результаты своих расчетов, подтверждающих наличие определенного влияния учета изменений скорости, — Костюк О. М. об этом также не говорит. Излагая «предлагаемое» им решение задачи, Костюк О. М. получает в рассматриваемой статье [Л. 18] основные уравнения (9) и (10), которые полностью повторяют уравнения (19, 18) и (19, 19) Жданова П. С. [Л. 2], о чем также не упоминается. (То обстоятельство, что несколько изменены обозначения и в правую часть уравнений введено возмущение момента двигателей, не имеет значения.)

³ Нумерация ссылок в цитатах дается по списку литературы настоящей статьи.

Наконец, говоря о критической части статьи [Л. 18], следует отметить, что выступая в ней уже с такими ширококонтентными утверждениями в отношении принципиальной ошибочности теории устойчивости энергосистем, не учитывающей изменения моментов, зависящих от скорости машин, Костюку О. М. следовало рассмотреть также большую работу Жданова П. С. [Л. 1] и его докторскую диссертацию, посвященные в основном этому вопросу, в которых приведены результаты многочисленных расчетов, а также хотя бы работы Горева А. А. [Л. 7 и 8] и др. Можно с полным основанием утверждать, что в работах Жданова П. С., Горева А. А., Марковича И. М., Совалова С. А., Брука И. С., Щедрина Н. Н., на которые появились ссылки в последней статье Костюка О. М. [Л. 21], вопрос о влиянии моментов, зависящих от скорости машин, рассмотрен значительно объективнее и полнее, чем сделано в [Л. 18].

Обращает на себя внимание то, что в последней статье [Л. 21], повторяя общие критические заявления, в качестве главного основания для них Костюк О. М. выдвигает уже другие вопросы — некорректное (будто бы!) упрощение уравнений Парка—Горева и неумение (будто бы!) правильно сформулировать уравнения установившегося режима электрической сети энергосистемы, охватывающей и обмотки статора синхронных машин (см. цитату в начале статьи). Вопрос об упрощении дифференциальных уравнений синхронной машины в таком виде, в каком это применял Лебедев С. А. [Л. 5] при исследовании статической устойчивости энергосистем, был подробно рассмотрен Горевым А. А. [Л. 7]. Горев А. А. аналитически и на конкретных примерах исследовал погрешность от упрощения полных уравнений при расчете переходных процессов для возмущений различного рода. И этого рассмотрения следовало, что для возмущений определенного класса (и для расчетов статической устойчивости на основе общей теории Ляпунова, когда возмущения в явном виде не фигурируют) упрощение полных уравнений сводится к пренебрежению сравнительно быстро протекающим переходным процессом, обусловленным малой постоянной времени цепи статора. Именно это в качестве предпосылки для вывода упрощенного дифференциального уравнения синхронной машины при анализе ее устойчивости указывалось еще в 1934 г. в книге Лебедева С. А. и Жданова П. С. [Л. 6] и в 1948 г. в книге Жданова П. С. [Л. 2]. Между тем Костюк О. М. пытается в первом разделе своей статьи [Л. 21], названном «Необоснованные упрощения уравнений Парка—Горева», создать представление, что «характерный» смысл упрощения заключается не в пренебрежении электромагнитной инерцией контура обмотки статора, а в чем-то ином. В действительности, как выше сказано, предпосылкой упрощенных уравнений Парка—Горева является мгновенное изменение тока в этой цепи, о чем свидетельствует анализ, выполненный Горевым А. А., и четкая формулировка предпосылки упрощения, данной в работах Лебедева С. А. и Жданова П. С. Совершенно очевидно, что упрощенные по этой предпосылке уравнения Парка—Горева могут использоваться как с дополнительными упрощениями более обще-

го характера при расчетах устойчивости (равенство в относительных единицах момента и мощности синхронных машин и механических двигателей, постоянство параметров элементов электрической сети при малых свободных движениях энергосистемы, пренебрежение переходными процессами в линиях, трансформаторах и электромагнитных цепях нагрузок в узлах сети) или без тех или иных дополнительных упрощений. Важно лишь, чтобы эти упрощения были оговорены при разработке конкретных методов расчета устойчивости и, если возможно, давалась, как мы уже отмечали, ориентировочная оценка количественного влияния упрощений на величину запаса устойчивости системы.

Между тем Костюк О. М. рассматривает вопрос о таких дополнительных упрощениях, как различные «точки зрения, относящиеся к процедуре упрощения полных уравнений Парка—Горева» [Л. 21]. Это наряду с отсутствием указанных выше важных ссылок делается для того, чтобы придать большее значение выдвинутому на первый план утверждению о необоснованности упрощений уравнений Парка—Горева как оправданию «принципиальной» критики современной (включая и работы Крылова Н. М. и Боголюбова Н. Н., Жданова П. С., Горева А. А. и др.) теории устойчивости энергосистем. В действительности же ничего принципиально нового в вопрос об упрощении уравнений Парка—Горева Костюк О. М. не вносит. Главный смысл его преобразований заключается в пренебрежении переходным процессом в контуре обмотки статора синхронной машины, допустимость чего при анализе статической устойчивости обоснована в значительной мере Горевым А. А. Что же противопоставляет Костюк О. М. «необоснованно» упрощенному уравнению Лебедева — Жданова? Предлагается замещать синхронную машину простым сопротивлением $Z(\omega)$ и учитывать его зависимость от изменения мгновенной частоты собственной э. д. с. и напряжения на зажимах [Л. 21]! Такое упрощение, значительно более грубое, чем критикуемое Костюком О. М. упрощение уравнений Парка—Горева, также было известно, а Костюк О. М. количественной оценки его обоснованности для расчетов статической устойчивости энергосистем не дает. Есть несомненная нелогичность в большом значении, которое он придает учету моментов, зависящих от незначительных изменений скорости вращения машин при малых свободных колебаниях, имеющих частоту 0,5—1,0 1/сек (и, тем более, при начальной стадии апериодического нарушения устойчивости в малом, что подробнее рассматривается нами ниже), и в грубом упрощении уравнений синхронных машин.

Ничего нового нет и в предложении рассчитывать режимы линеаризованных систем при различных частотах э. д. с. машин, пользуясь методом наложения. Для более общего случая, чем рассматривает Костюк О. М., это было сделано Ждановым П. С. [Л. 2], причем Костюк О. М. об этом умалчивает. Затем Костюк О. М. заменил предложения об использовании метода наложения в многочастотной схеме в том виде, в каком это было изложено у Жданова П. С. (частотно-зависимые собственные и взаимные сопротивления для всех

э. д. с. машин в полной схеме замещения системы), предложением записывать «уравнения малых колебаний энергосистемы с введением координат заданной точки сети» [Л. 20 и 21]. При этом Костюк О. М. упомянул, что нечто в этом роде для схемы двух машин с нагрузкой сделано в [Л. 8], только более сложно. Но громоздкость выкладок Горева А. А. связана с тем, что он одновременно использовал полные уравнения динамики синхронных машин. Это не изменяет, конечно, того, что идея введения уравнений Кирхгофа для заданной точки сети с нагрузками принадлежит Гореву А. А. Эта идея принципиально не связана с тем, как записываются уравнения синхронных машин. Для многомашинной схемы с несколькими нагрузками идея Горева А. А. была применена автором настоящей статьи, но это не изображалось как оригинальное предложение [Л. 28].

Таким образом, и в отношении записи уравнений статике электрических цепей переменного тока энергосистемы, чему Костюк О. М. придал такое большое значение [Л. 21], он не предложил ничего принципиально нового, но умолчал об аналогичных предложениях Жданова П. С. и Горева А. А. или необъективно их характеризовал. Действительно же, новым является то, что Костюк О. М. смешивает представления об уравнениях установившегося режима (статике) системы, исходного для анализа устойчивости при отсутствии конкретных возмущений (по Ляпунову), с уравнениями нового установившегося режима после динамического перехода при конкретном возмущении. В первом случае, поскольку частота режима задана, свободный член характеристического определителя системы алгебраических уравнений не зависит от изменения частоты. Во втором случае свободный член характеристического определителя системы уравнений динамики зависит от изменения частоты, поскольку при заданном конкретном возмущении частота нового режима (самоустанавливающегося — по терминологии [Л. 17]) может отличаться от частоты исходного режима. При анализе асимптотической устойчивости в малом по Ляпунову, хотя частота устойчивого режима системы не должна измениться, свободный член характеристического определителя уравнений возмущенного (в смысле Ляпунова) движения зависит от изменений скорости машин, так как уравнения возмущенного движения получаются вариацией по независимым переменным (в том числе по скоростям) исходных дифференциальных уравнений системы. Между тем Костюк О. М., говоря о критериях устойчивости (соответствующих, фактически, критериям асимптотической устойчивости по Ляпунову), вводит в уравнения динамики конкретные возмущения [Л. 18] и предполагает возможность нового установившегося режима, отличного от исходного.

Покажем теперь, что «вступают в принципиальное противоречие с классическими положениями теоретической механики» не «взгляды» Жданова Н. С., Горева А. А., Лебедева С. А., Веникова В. А. и др., а неправильные по существу заявления Костюка О. М. о «недопустимом отрыве проблемы устойчивости относительного движения машин от проблемы их абсолютного движения»

[Л. 21]. Следует предварительно отметить, что претендуя в своей столь отрицательной оценке на охват всей современной теории устойчивости энергосистем, Костюк О. М. умалчивает о работах Щербачева О. В. и его сотрудников [Л. 13 и 17], проведенных и продолжаемых в Ленинградском политехническом институте, в которых учитывается влияние моментов, зависящее от скорости вращения машин, и в которых нет «недопустимого отрыва», указанного выше. Костюк О. М. не упоминает и о работе Меерова М. В. [Л. 22], в которой также нет «недопустимого отрыва», поскольку анализируется устойчивость системы, в которой на электростанциях учитываются в явном виде автоматические регуляторы скорости, частоты и напряжения. Не отмечается и ряд других работ советских (Ледянкина Д. П., Урусова И. Д., Лукашова Э. С. и др.) и иностранных (Крона Г. и др.), которые несомненно подпадают под определение «современная теория статической устойчивости энергосистем», так как в них рассматриваются общие критерии устойчивости и практические методы ее анализа, и которые имеют существенное значение с точки зрения оценки приоритета в ряде вопросов, рассмотрение которых Костюк О. М. считает существенно новым.

Установив, что современная теория устойчивости энергосистем охватывает ряд работ, в которых анализ устойчивости относительного движения машин не «отрывается» от анализа устойчивости их абсолютного движения, выделим еще работы, посвященные анализу устойчивости симметричных энергосистем, а также энергосистем с внутригрупповой симметрией многоагрегатных станций [Л. 23, 24 и др.]. Эти работы весьма показательны для рассматриваемого вопроса. В них как для общего случая динамических систем, так и для энергосистем доказано, что при симметрии структурной схемы и режима условия устойчивости абсолютного и относительного движения являются, вопреки утверждению Костюка О. М., раздельными. Это имеет место, несмотря на учет моментов, зависящих от скорости машин. При этом может рассматриваться любой режим системы, а не только режим холостого хода упрощенной схемы, как отмечается в [Л. 18 и 21]. Таким образом, есть основания подвергнуть сомнению фундаментальное утверждение Костюка О. М., относящееся к классическим положениям теоретической механики. На чем его основывает Костюк О. М.? На том, что из системы однородных уравнений возмущенного движения системы можно последовательно исключить все переменные (координаты движения), кроме любой одной (обозначим ее Δx), и получить в результате характеристический полином $D(p)$ из уравнения вида $D(p)\Delta x = 0$ [Л. 18]. В рассматриваемом Костюком О. М. случае переменной Δx могут быть как абсолютные углы $\Delta \delta_1$, $\Delta \delta_2$, так и относительный угол $\Delta \delta_{12}$. Отсюда Костюк О. М. и делает вывод о недопустимости «отрыва» анализа устойчивости абсолютного и относительного движения. Но если бы Костюк О. М. рассматривал ту же задачу, но с учетом электромагнитных переходных процессов в синхронных машинах, то в качестве переменной Δx могла бы фигурировать и любая учитываемая координата урав-

нений динамики электромагнитного режима машины в цепях статора и ротора. Можно ли на этом основании делать критически обобщающие выводы о «недопустимости отрыва» анализа устойчивости механического движения машин от их электромагнитного режима? А ведь этот отрыв Костюк О. М. допускает в своих работах: в [Л. 18] «отрываются» электромагнитные процессы и динамика автоматического регулирования, в [Л. 21] указывается, что можно не учитывать переходные процессы в цепи статора (а ведь это тоже, с позиции Костюка О. М., недопустимый отрыв). Очевидно, допустимость раздельного анализа устойчивости для абсолютного и относительного движения определяется не видом уравнения $D(p) = 0$, а практической постановкой задачи и представлениями (желательно, обоснованными хотя бы примерными расчетами) о том, какими факторами при этой постановке задачи можно пренебречь.

Непосредственному анализу устойчивости должен предшествовать выбор обобщенных координат (независимых переменных в уравнениях возмущенного движения), в отношении которых проверяется устойчивость. Этот выбор производится в соответствии с физическим и техническим смыслом конкретных задач. В [Л. 25] в качестве первого пункта общего плана решения задач аналитической механики рекомендуется выбрать систему обобщенных координат:

«1. Выбор системы обобщенных координат. От удачного выбора обобщенных координат, что может явиться результатом известного опыта, зависит иногда возможность простого доведения до конца решения задачи. Прежде чем выбирать обобщенные координаты, следует определить число степеней свободы системы. В противном случае можно пропустить какие-нибудь координаты или, наоборот, наметить лишние, зависящие друг от друга координаты». Заметим, между прочим, что Костюк О. М. неправильно указывает, что $\Delta \omega_1$, $\Delta \omega_2$ и $\Delta \delta_{12}$ являются тремя независимыми переменными [Л. 18]. В действительности же, $\Delta \delta_{12}$ является зависимой переменной по отношению к $\Delta \omega_1$ и $\Delta \omega_2$.

По техническому смыслу задачи анализа статической устойчивости энергосистем в качестве электромеханических координат выбираются углы между магнитными осями роторов машин, отсчитываемые от воображаемой оси, вращающейся с неизменной скоростью, соответствующей синхронной скорости машин в проверяемом на устойчивость исходном невозмущенном режиме (эти углы и производные их по времени имеет в виду Костюк О. М., говоря об абсолютных углах, абсолютных скоростях и абсолютном движении). Указанную воображаемую ось отсчета углов можно связать с определенным физическим представлением, полагая, например, что она совмещена с магнитной осью ротора воображаемой автономной синхронной машины, вращающейся с указанной неизменной скоростью. Такая замена координатных осей соответствует положениям теоретической механики [Л. 25], движение машин энергосистемы по отношению к автономной машине может рассматриваться как абсолютное (мы предпочитаем называть его условно-абсолютным, так как синхронная скорость вра-

щения машин в различных исходных невозмущенных режимах может быть различной). Если же ось отсчета углов машин энергосистемы будет совмещена с магнитной осью ротора одной из них, то будут определяться относительные углы и относительные скорости в относительном движении. Разумеется, движение динамической системы является единым, и понятие относительного движения в теоретической механике введено по соображениям практической целесообразности. В нашем случае достаточно устремить к бесконечности величину момента инерции J машины, с которой совмещена ось отсчета углов, чтобы относительное движение машин энергосистемы превратилось в абсолютное. При дополнительной предпосылке неизменности э. д. с. машины с $J \rightarrow \infty$ точка приложения этой э. д. с. превращается в так называемые «шины бесконечной мощности». Отметим попутно, что Костюк О. М. ошибается, когда говорит, что при введении в схему замещения энергосистемы шин бесконечной мощности исчезает упругая связь между машинами. Это справедливо лишь для весьма упрощенных схем, в большинстве же реальных схем с несколькими кольцевыми связями между машинами (электростанциями) введение в одну из связей (или, тем более, на ответвлении одной из них) шин бесконечной мощности не приводит к отсутствию упругих связей между машинами.

В общем случае, анализируя устойчивость относительного движения, нужно также учитывать и переносное движение. Для энергосистемы это означает, что следовало бы учитывать возможность нарушения устойчивости по общей частоте системы. Но с практической стороны устойчивость по частоте при малых возмущениях в подавляющем большинстве случаев можно считать заведомо обеспеченной. Это не относится, разумеется, к задачам, связанным с разработкой или исследованием автоматических регуляторов скорости (АРС) механических двигателей генераторов или специальных автоматических регуляторов частоты (АРЧ). Предпосылка обеспеченности устойчивости по частоте (благодаря наличию правильно работающих АРС) может быть сделана при анализе статической устойчивости энергосистемы аналогично тому, как делается предпосылка обеспеченности устойчивости системы по самораскачиванию (что также предполагает правильную работу АРС и АРВ). Первая предпосылка позволяет анализировать лишь устойчивость относительного движения по относительным углам (с соответствующим учетом, если желательно, электромагнитных переходных процессов в машинах и АРВ), вторая предпосылка позволяет проверять лишь возможность аperiodического нарушения устойчивости. Второй предпосылкой Костюк О. М. пользуется, а тем, кто пользуется первой, обвиняет в противоречии классическим положениям теоретической механики, неправильно распространяя это обвинение на всю современную теорию устойчивости энергосистем. Делает это Костюк О. М., как он и указывает [Л. 18], для того, чтобы связать с этим обвинением свое утверждение о недопустимости даже в случае, когда заведомо оговаривается идеализирующее упрощение задачи (анализ устойчивости относительного движения, по-

зиционность системы), использование уравнения (1), являющегося частным случаем линейаризованных уравнений Д'Аламбера для n синхронных машин и уравнений связей. Они могут быть записаны в следующем виде для получения уравнений возмущенного (в смысле Ляпунова) движения системы при анализе устойчивости в малом:

$$T_{J_k} p^2 \Delta \delta_k + \sum_{s=2}^n \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{1s}} \Delta \delta_{1s} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad \Delta \delta_{1s} = \Delta \delta_1 - \Delta \delta_s. \quad (2)$$

Костюк О. М. считает, что этими уравнениями пользоваться нельзя, так как они несовместны. Несовместность понимается в таком смысле, что если непосредственно в уравнения (1) ввести правую часть (конкретное возмущение) и рассчитывать по ним переходный процесс, то новый установившийся режим получается неоднозначно. Но, во-первых, уравнения возмущенного (в смысле Ляпунова) движения не предназначены для расчета конкретных переходных процессов, ошибочность этого подробно рассмотрена в [Л. 26]; во-вторых, количество уравнений (2) заведомо превышает на единицу число координат (относительных углов), которые были предварительно выбраны для анализа устойчивости. Поэтому уравнения (2) преобразуются (делятся на T_{J_k} и последовательно вычитаются в данной записи из первого уравнения). Тогда получается $(n-1)$ уравнение и $(n-1)$ координата:

$$\left[p^2 + \left(\frac{1}{T_{J_1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{1s}} - \frac{1}{T_{J_s}} \frac{\partial P_s}{\partial \delta_{1s}} \right) \right] \Delta \delta_{1s} = 0, \quad s = 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

В частности, для двухмашинной схемы получается одно уравнение (1) с одной независимой переменной $\Delta \delta_{12}$ и отсутствует несовместность уравнений в отношении анализа устойчивости в малом.

Далее уравнение (1) критикуется следующим образом [Л. 18]: «Следовательно, если бы система обладала затуханием, то установившийся режим, характеризующий свободным членом характеристического уравнения, зависел бы от величин моментов инерции машин. Однако известно, что свободный член характеристического уравнения никогда не содержит динамических параметров (постоянных времени, инерции и т. п.)». Речь явно идет об определении установившегося режима. Приходится снова повторить, что уравнения (1) и (2) не предназначены для расчета переходных процессов и новых установившихся режимов, а используются для анализа устойчивости в малом, причем по критерию, который по доказательству Ляпунова определяет асимптотическую устойчивость. Последнее является существенным и означает, что проверяемый исходный установившийся режим в результате возмущений, которые можно трактовать как бесконечно малые импульсы, произвольные по типу и месту приложения, сохраняется неизменным (это распространяется и на бесконечно малые постоянно действующие возмущения). Концепция устойчивости Ляпунова не является единственно возможной и

обязательной. Но его метод первого приближения оценки устойчивости в малом получил широкое признание и весьма эффективное применение.

Анализ устойчивости в малом, конечно, не дает исчерпывающего решения сложных технических задач, поэтому в практике анализа устойчивости энергосистем важное значение имеют также расчеты электромеханических переходных процессов при больших (иногда и при малых конечных) возмущениях, выполняемые численным интегрированием дифференциальных уравнений. В этих расчетах учитываются, как правило, с более или менее существенными упрощениями моменты, зависящие от изменения скорости машин.

Возвращаясь к аргументации Костюка О. М. «...если бы система обладала затуханием...», нужно обратить внимание еще на то, что это говорится по отношению к идеализированному случаю, когда заведомо была принята предпосылка, что система не обладает затуханием. Здесь уместно отметить, что для любых идеализирующих упрощений в технических задачах неизбежно искажается характер тех или иных физических явлений и только на этом основании отвергать их нельзя. Идеализация, практически допустимая для данной задачи, может оказаться неприемлемой для другой задачи. Нетрудно видеть, что и методика расчета устойчивости энергосистемы, которую Костюк О. М., повторяя в [Л. 18] Жданова П. С. [Л. 1 и 2], считает «правильной», содержит ряд идеализирующих упрощений, которые при видоизменении постановки задачи или, тем более, при замене одной задачи другой, приведут к формально парадоксальным соотношениям, несущественность которых для определенных практических задач очевидна или может быть обоснована типовыми расчетами.

Интересно, что если согласиться с аргументацией Костюка О. М., сводящейся к тому, что свободный член характеристического уравнения — «неотъемлемая часть уравнений статики» [Л. 21] и может быть получен из определителя матрицы коэффициентов исходных уравнений динамики энергосистемы, положив в них $p=0$, то свободный член при анализе асимптотической устойчивости в малом не должен зависеть не только от моментов инерции машин и постоянных времени электрических контуров, но и от параметров демпфирования в виде частных производных моментов M по скоростям машин (т. е. от изменения этих скоростей), которые можно учесть в исходных уравнениях членами типа

$$f \left[\frac{\partial M_{i \text{ мех}}}{\partial \omega_k}, \frac{\partial M_{i \text{ эл}}}{\partial \omega_k} \right] p \Delta \delta_i, \quad i, k = 1, 2, \dots, n).$$

Между тем свободный член от этих параметров зависит; Костюк О. М. в [Л. 18—21] этой зависимостью пользуется.

То обстоятельство, что свободный член характеристического уравнения при консервативной позиционной идеализации энергосистемы зависит от моментов инерции машин, давно уже рассматривалось в ряде работ, и Костюк О. М. ничего существенно нового по этому вопросу не сказал. Он по-

вторяет ранее высказывавшиеся в некоторых из этих работ мнения, что консервативной позиционной идеализацией (Костюк О. М. называет ее «позиционной теорией») пользоваться не следует, не доказывая это практическими расчетами, выявляющими погрешность определения запаса устойчивости. Наряду с этим Костюк О. М. умалчивает о том, что еще Лебедев С. А. [Л. 5] использовал для анализа статической устойчивости энергосистемы вместо уравнений (2) уравнение, учитывающее диссипацию энергии возмущенного движения при анализе устойчивости в малом. Для системы n машин это уравнение имеет известный вид:

$$T_{i_k} p^2 \Delta \delta_k + P_{d_k} p \Delta \delta_k + \Delta P_k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Уравнения (4) применяются в современной теории устойчивости энергосистем, в частности они использованы в алгоритмах и программах расчета статической устойчивости, разработанных Институтом электродинамики АН УССР [Л. 14]. Свободный член характеристического уравнения системы при этом от моментов инерции машин не зависит, несовместности уравнений (в трактовке Костюка О. М.) не получается. Поскольку критика Костюка О. М. оперирует этими обстоятельствами, отсутствие в работах [Л. 18—21] упоминания об уравнениях (4) показывает тенденциозность этой критики, стремящейся представить теорию статической устойчивости энергосистем принципиально неправильной.

Если наряду с чисто теоретическими вопросами учитывать соотношения в практических расчетах статической устойчивости энергосистем, то, как полагал с достаточными основаниями Жданов П. С., полный учет моментов, зависящих от малых изменений скорости машин, приводит к появлению в коэффициентах характеристического уравнения системы малых параметров n , что наиболее существенно, свободный член этого характеристического уравнения, также будучи зависимым от этих малых параметров, при пренебрежении ими становится равным нулю. При этом понижается порядок характеристического уравнения. Возможность такого вырождения характеристического уравнения Костюк О. М. отрицает, считая, что понижение его порядка возможно лишь за счет пренебрежения малыми параметрами типа моментов инерции и постоянных времени, когда становится равным нулю коэффициент при старшем члене характеристического полинома. Вырождение за счет равенства нулю свободного члена показывает с принципиальной стороны закономерность появления зависимости от моментов инерции машин в свободном члене вырожденного характеристического полинома, и в этом нет усматриваемого Костюком О. М. противоречия «классическим положениям теоретической механики».

Рассматривая этот вопрос, Жданов П. С. руководствовался анализом, выполненным в книге Хайкина С. Э. «Теория колебаний», который навряд ли противоречит классической механике [Л. 1]. Хайкин С. Э. рассматривает характеристическое урав-

нение вида:

$$p^h + (A_{h-1} + \lambda_{h-1})p^{h-1} + \dots + (A_1 + \lambda_1)p + \lambda_0 = 0, \quad (5)$$

где λ_k ($k=0, 1, 2, \dots, h-1$) — малые параметры ($\lambda_k \ll A_k$).

Поскольку достаточно полные и надежные сравнительные расчеты на ЦВМ, о подготовке которых упоминалось выше, еще не выполнены, приведем простейшие оценки, дающие основание для предположения, что влияние моментов, зависящих от изменения скорости машин в режимах, близких к пределу статической устойчивости, весьма незначительно. Тем более незначительным будет это влияние на запас устойчивости. Поэтому, как подробно рассмотрено в [Л. 1] и несколько дополнено в [Л. 15], неразумно было бы безапелляционно отказываться от проверки критерия устойчивости упрощенной (позиционной) системы и сопоставления его лишь в типовых расчетах с теоретически более точным критерием, но более сложным и использующим дополнительные расчетные данные, вероятная погрешность которых может быть довольно большой.

В [Л. 11] Костюк О. М., следуя литературным источникам, отмечает, что частота свободных колебаний в энергосистемах (имеются в виду колебания, связанные с механическим движением синхронных машин) равна $0,5 \div 1,0$ гц. Эти данные используются для подтверждения допустимости пренебрежения быстрым переходным процессом в цепи статора. По они полезны и для интересующей нас оценки. Следует учесть прежде всего, что указанная выше частота колебаний относится не к режимам, близким к пределу статической устойчивости, а к режимам, близким к номинальной нагрузке и обладающим, примерно, нормативным запасом устойчивости. Расчеты и эксперименты показывают, что в режимах, близких к нарушению устойчивости (типа самораскачивания по углу ротора синхронных машин), частота свободных колебаний в энергосистеме уменьшается по сравнению с приведенной выше в несколько раз. Можно поэтому заключить, что изменение скорости вращения $\Delta\omega$ синхронных машин (по отношению к скорости ω_0 при частоте исходного режима, близкой к 50 гц) составит в начальной стадии нарушения устойчивости типа самораскачивания величину около десятих долей процента. Еще более медленно развивается процесс аperiodического (или близкого к нему) нарушения устойчивости. Так, опыт с турбогенератором 10 Мвт показал [Л. 6], что за первые 5 сек при нарушении устойчивости угол ротора изменяется на величину, приблизительно равную 10 град, т. е. изменение скорости $\Delta\omega$ составляет сотые доли процента. Приведенные оценки дают основание пренебречь при расчете запаса устойчивости влиянием изменения скорости машин на величину их э. д. с. и на соотношение между мощностью P и моментом M на валу машин:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\omega_0 + \Delta\omega}. \quad (6)$$

Малое значение изменений скорости машин в начале процесса нарушения статической устойчивости дает также основание полагать, что реактивные сопротивления электрической сети будут мало изменяться по сравнению со своими значениями

в исходном, проверяемом на устойчивость, режиме системы, а скольжение асинхронных двигателей комплексной нагрузки в узлах сети будет в большей мере определяться изменением модуля вектора напряжения в этих узлах, чем мгновенной частотой.

В отношении моментно-скоростных характеристик механических двигателей, в особенности мощных турбин, следует учесть при анализе устойчивости в малом наличие зоны нечувствительности в устройствах автоматического регулирования скорости и их инерционность. Поэтому в начале нарушения статической устойчивости поток энергоносителя в механическом двигателе не будет изменяться [Л. 1], что соответствует постоянству мощности в соотношении (6) и весьма малому изменению момента. Здесь речь идет об определении запаса статической устойчивости энергосистемы (в особенности аperiodической устойчивости), дополняемом, как уже указывалось, расчетами электромеханических переходных процессов при конечных возмущениях, для которых могут учитываться моментно-скоростные характеристики механических двигателей и другие, указанные выше, моменты, зависящие от изменения скорости машин. При анализе устойчивости в малом такой учет необходим, естественно, при разработке новых автоматических регуляторов скорости и при аналогичных задачах, органически связанных с влиянием даже малых моментов, зависящих от изменения скорости машин. Но эти задачи не входят в комплекс практических расчетов устойчивости систем.

Более строгие и полные оценки по сравнению с приведенными выше должны дать экспериментальные исследования на ЦВМ, для чего разрабатываются необходимые программы. Эти исследования охватят также с помощью метода статистических испытаний практически важный вопрос о влиянии неизбежной случайной погрешности исходных данных как для расчетов с учетом изменений скорости машин, так и без него. Все это делается на основе современной теории устойчивости энергосистем, а не противопоставляется ей.

Разработка алгоритмов для программ расчетов на ЦВМ подтвердила, что характеристическое уравнение, полученное с учетом моментов, зависящих от изменений скорости машин (будем называть его полным), при пренебрежении всеми этими моментами или некоторыми из них вырождается в уравнение более низкого порядка. Понижение порядка обусловлено тем, что свободный член характеристического уравнения становится равным нулю, но это не означает, что систему следует рассматривать как неустойчивую. В одном случае Костюк О. М. сам делает такое заключение, рассматривая в [Л. 18] уравнения (10), в которых свободный член характеристического полинома равен нулю. В другом случае он допускает противоположное заключение. В [Л. 21] Костюк О. М. рассматривает для той же двухмашинной системы три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} T_{J_1} p \Delta\omega_1 + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \Delta\delta_{12} &= 0; \\ T_{J_2} p \Delta\omega_2 + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \Delta\delta_{12} &= 0; \\ \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2 - p \Delta\delta_{12} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

и пишет, что для скоростей $\Delta\omega_1$, $\Delta\omega_2$ получается характеристический полином из уравнения

$$\left(T_{J_1}T_{J_2}p^2 + T_{J_2}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} + T_{J_1}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}}\right)p\Delta\omega_{1,2} = 0. \quad (8)$$

В этом случае наличие общего множителя p (нулевого корня) Костюк О. М. считает доказательством того, что система неустойчива и может находиться лишь в режиме холостого хода.

Уравнение (8) действительно получается в подобном виде, если развернуть характеристический определитель системы (7):

$$\begin{vmatrix} T_{J_1}p & 0 & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \\ 0 & T_{J_2}p & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \\ 1 & -1 & -p \end{vmatrix} = 0. \quad (9)$$

Но в этом уравнении после множителя p следует равноправно написать кроме $\Delta\omega_1$, $\Delta\omega_2$ еще и $\Delta\delta_{12}$, что опровергает дальнейшие рассуждения Костюка О. М. Если же последовательно исключить из первого уравнения $\Delta\delta_{12}$ и $\Delta\omega_2$ (или из второго — $\Delta\delta_{12}$ и $\Delta\omega_1$), то в характеристическом уравнении (8) общим множителем будет не p , а p^2 . Такое излишнее повышение порядка характеристического полинома при исключении переменных из системы однородных операторных уравнений пояснено в [Л. 28]. Связывать с ним заключения о неустойчивости системы не следует.

Правильным является следующее заключение, отличающееся от рассуждений Костюка О. М. в обоих случаях. Рассматривается система, описываемая двумя исходными уравнениями с двумя независимыми координатами $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$. Поскольку делается предположение, что исследуется устойчивость только относительного движения, описываемого одной координатой $\Delta\delta_{12} = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_2$, исходные уравнения содержат избыточную информацию. Поэтому в их характеристическом полиноме должен быть нулевой корень, что формально указывает на критический случай (граница устойчивости в малом в отношении координат $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ абсолютного движения). По существу же, этот корень, тождественно равный нулю, указывает на отсутствие оценки устойчивости абсолютного движения системы. Это не противоречит указанной выше предположке, причем система, абсолютное движение которой даже неустойчиво, может сохранять устойчивость относительного движения (координаты $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ могут изменяться синфазно). Анализ устойчивости относительного движения синхронных машин имеет физический смысл и практическое значение, если заведомо известно, что абсолютное движение устойчиво.

При рассмотрении результатов анализа и расчета сравнительно простых схем необходимо иметь в виду следующие соображения. Для схемы, в которой станция работает через линию электропередачи на мощную приемную систему с двигательной и статической нагрузкой, аperiodический предел устойчивости по критерию, пренебрегающему моментами, зависящими от скорости, и по критерию, учитывающему эти моменты, имеет незначительные

отличия [Л. 1 и 2]. Расчет схемы с двумя синхронными машинами и статической нагрузкой при почти полной симметрии (неодинаковы лишь моменты инерции машин) показал большое отличие в отношении предельного угла между синхронными машинами [Л. 1]. По Жданов П. С. привел результаты последнего расчета для иллюстрации того, что оперирование малыми параметрами требует большой осторожности при вычислении свободного члена характеристического уравнения.

При анализе (для схемы одной станции, работающей через линию электропередачи на мощную систему) предела устойчивости по самораскачиванию [Л. 5] следует отметить, что и при учете механического демпфирования ($P_d = 0$) сохранялось демпфирование токов в контуре обмотки возбуждения синхронной машины.

Нельзя, наконец, обойти молчанием еще следующую аргументацию, которую применяет Костюк О. М. По вопросу об учете в уравнениях возмущенного движения синхронных машин моментов, зависящих от изменения скорости, в [Л. 18] говорится: «Ведь при $M \approx P$ угловая скорость должна оставаться постоянной ($\omega \approx 1 \approx \text{const}$). Но при этом вполне правомочным является соотношение $d\omega/dt = 0$ или $d^2\delta/dt^2 = 0$. Таким образом, задача отыскания дифференциального уравнения колебаний при этом теряет всякий смысл, так как координата ω или δ в данном случае является, по существу, закреплённой». Это означает, что если в соотношении (6) Жданов П. С. и др. пренебрегают малой величиной $\Delta\omega$ по сравнению с ω_0 , то теряет будто бы смысл анализ устойчивости системы, в котором $\Delta\omega$ (или $\Delta\delta$) фигурируют как независимые переменные в уравнениях возмущенного движения. Аналогичные утверждения Костюк О. М. высказывает [Л. 20] в связи с вопросом об упрощении уравнений Парка — Горева. Из такой аргументации следует, что нельзя пользоваться, например, известными разложениями в ряды и пренебрежением в этих разложениях членами, содержащими малые параметры более высокого порядка, удерживая члены более низкого порядка.

В [Л. 21] более подробно излагается аргументация [Л. 18] относительно того, что при позиционной идеализации уравнения (2) являются совместными лишь для системы, находящейся в режиме идеального холостого хода. Доказательство основывается на том, что для нагруженной, например двухмашинной, системы угол α_{12} (характеризующий активное сопротивление связи между э. д. с.) не может быть малым. Дополнительно к тому, что уже сказано нами по вопросу о совместности однородных дифференциальных уравнений при анализе устойчивости в малом (которые Костюк О. М. рассматривает как неоднородные с возмущением в правой части), отметим следующее. Если одни синхронные машины в системе будут генераторами, а другие двигателями, при отсутствии промежуточных нагрузок углы α будут малыми, а при допуске Костюком О. М. пренебрежении активными сопротивлениями связей — равными нулю. Энергосистема при этом в теоретическом анализе должна рассматриваться как нагруженная, и позиционная идеализация ее не опровергается даже с позиций Костюка О. М.

Концепция возможности (будто бы, по современной теории устойчивости энергосистем) только режима холостого хода характерным образом развивается и в следующем разделе работы [Л. 21], имеющем заголовок: «Диссипативные системы, не совершающие полезной работы». Этот раздел начинается так [Л. 21, с. 86]: «Оказывается, что в современной теории устойчивости диссипативные системы отличаются от консервативных учетом переходных процессов в обмотках ротора ..., а регулируемые — дополнительным учетом регуляторов возбуждения [Л. 12, 13, 19]⁴. Далее признается: «Хотя переходные процессы в обмотках ротора могут приводить к затуханию относительных колебаний машин, по с точки зрения установившихся режимов такая «диссипативная система» ничем не должна отличаться от позиционной». Почему же, все-таки, «ничем»? Ведь при позиционной идеализации, включающей, как это неоднократно указывалось, и консервативную идеализацию, относительные колебания машин не затухают, значит отличие все же имеется. Нелогичность утверждения очевидна. Взятая в кавычки такая «диссипативная система» была рассмотрена в [Л. 28], где говорится: «Системы этого типа можно назвать системами с частичной или относительной диссипацией, поскольку успокоительные моменты проявляются только во взаимном относительном движении синхронных машин». Костюк О. М. не только умалчивает об этом, но изображает своей ссылкой вопрос таким образом, как будто в [Л. 28] этим системам (при учете переходных процессов в роторе и АРВ) приписывается диссипативность и в абсолютном движении машин — именно в этом смысле применены отмеченные выше кавычки. Неприглядность этого замечает, если учесть, что странницей раньше [Л. 21] Костюк О. М. пользуется в таблице понятием системы с разными видами диссипации, заменив лишь термины «частичная, относительная» на «внутренняя, взаимная», не делая ссылки на [Л. 28]. Отметим, кстати, что призывая возможность затухания колебаний только в относительном движении машин (при отсутствии, естественно, затухания в абсолютном движении идеализированной системы), Костюк О. М. производит тот самый «недопустимый отрыв относительного движения от абсолютного», в котором он обвиняет теорию устойчивости энергосистем.

Как уже отмечалось, Костюк О. М. не рассматривает принятые в ряде работ (несмотря на то, что он на них ссылается) уравнения (4), исходные для анализа устойчивости системы с учетом диссипации энергии в абсолютном движении. Мотивы умолчания — понятны — к такой системе уже очень явно не подходит заголовок о невозможности полезной работы, и, вообще, еще труднее выдвигать тезис о «принципиальной ошибочности теории». Тем не менее Костюк О. М. считает возможным включить в свой критический обзор следующую фразу [Л. 21]: «Очень интересным, например, могло бы быть де-

тальное ознакомление с коэффициентом демпфирования колебаний P_d или P_h [Л. 12, 28]⁵, который так загадочно то появляется в уравнениях движения машин, то исчезает». По этому вопросу в [Л. 21] ничего больше не говорится. Поскольку, судя по списку литературы в [Л. 21], Костюку О. М. должно быть известно, что впервые в советской литературе включили в исходное уравнение движения синхронной машины (при анализе устойчивости) член с коэффициентом демпфирования — такие авторитетные ученые, как Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н., Лебедев С. А., Жданов П. С., высказывание в приведенном стиле по этому вопросу некорректно. Непонятно также, в чем усматривается «загадочность» того, что для оценки влияния демпфирования сравниваются результаты, получаемые для $P_d \neq 0$ и для $P_d = 0$, например в [Л. 5], или в других случаях, когда в упрощенных расчетных методах в зависимости от степени упрощения принималось или $P_d \neq 0$, или $P_d = 0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов П. С. О статической устойчивости сложных электрических систем. — «Труды ВЭИ», вып. 40. М. — Л., Госэнергоиздат, 1940, с. 100—194.
2. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем. М. — Л., Госэнергоиздат, 1948, 399 с.
3. Маркович И. М., Савалов С. А. Практические критерии статической устойчивости электрической системы. — «Электричество», 1945, № 3, с. 17—22.
4. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. М., «Энергия», 1969, 351 с.
5. Лебедев С. А. Исследование искусственной устойчивости. — «Труды ВЭИ», вып. 40. М. — Л., Госэнергоиздат, 1940, с. 5—99.
6. Лебедев С. А., Жданов П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем. М. — Л., Госэнергоиздат, 1934, 387 с.
7. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. М. — Л., Госэнергоиздат, 1950, 551 с.
8. Горев А. А. О статической устойчивости системы из двух синхронных машин, питающих нагрузку с заданными характеристиками. — «Труды ЛПИ», 1954, № 1, с. 10—50.
9. Ботвинник М. М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины. М. — Л., Госэнергоиздат, 1950, 63 с.
10. Шедрин Н. Н. К вопросу о статической устойчивости электроэнергетических систем. — «Электричество», 1945, № 9, с. 76—79.
11. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., «Высшая школа», 1970, 472 с.
12. Мамиконянц Л. Г. Токи и моменты асинхронных и синхронных машин при изменении скорости их вращения. — «Электричество», 1958, № 8, с. 54—63.
13. Горюнов Ю. П., Ножин Л. Э., Щербачев О. В. Программы расчетов на ЦВМ режимов сложных электрических систем, предельных по сползанию. — «Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР». М., «Энергия», 1969, с. 49—56.
14. Цукерник Л. В., Коробчук К. В. Расчет с помощью ЦВМ предела статической устойчивости (при отсутствии самораскачивания) сложной энергосистемы. — «Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР». М., «Энергия», 1969, с. 22—33.
15. Цукерник Л. В., Коробчук К. В. Некоторые вопросы методики анализа статической устойчивости сложных энергосистем. — «Доклады на III Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР». Л., «Энергия», 1973, с. 122—127.

⁴ Ссылки [Л. 13 и 19] соответствуют [Л. 2, 8 и 11] нашего списка литературы. Ссылка же [Л. 12] вызывает недоумение, так как в этой работе по рассматриваемому вопросу ничего не сказано.

⁵ Ссылка [Л. 12] по списку литературы в статье Костюка О. М. В обеих работах обозначения P_h нет, имеется обозначение D_h .

16. Совалов С. А., Шелухин Н. Н. и др. Сравнительный анализ программ расчета на ЦВМ статической устойчивости энергосистемы.— «Доклады на III Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР». Л., «Энергия», 1973, с. 348—367.
17. Ножин Л. Э. Исследование статической устойчивости установившихся и саморегулирующихся режимов электрических систем при помощи ЦВМ. Автореферат кандидатской диссертации. Изд. ЛПИ, 1970, 16 с.
18. Костюк О. М. О дифференциальных уравнениях в теории статической устойчивости энергосистем.— В кн.: Проблемы технической электродинамики, вып. 31. Киев, «Наукова думка», 1971, с. 23—37.
19. Костюк О. М. Линейные уравнения колебаний синхронных машин в энергосистеме с учетом частотных характеристик электромагнитных моментов.— В кн.: Проблемы технической электродинамики, вып. 37. Киев, «Наукова думка», 1972, с. 38—49.
20. Костюк О. М. Уравнения малых колебаний энергосистемы с введением в них координат заданной точки сети.— В кн.: Проблемы технической электродинамики, вып. 37, Киев, «Наукова думка», 1972, с. 12—22.
21. Костюк О. М. Метод малых колебаний и проблема статической устойчивости энергосистем.— «Автоматика», 1973, № 1, с. 80—90.

22. Мееров М. В. Введение в динамику автоматического регулирования электрических машин. Изд. АН СССР, М., 1956. 418 с.
23. Морозовский В. Т. Устойчивость параллельной работы однотипных синхронных генераторов.— «Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика», 1969, № 10, с. 71—86.
24. Цукерник Л. В. Устойчивость связанной системы автоматического регулирования при внутригрупповой симметрии.— «Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика», 1959, № 4, с. 23—32.
25. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики, ч. вторая. Л.—М., ОГИЗ, 1948. 580 с.
26. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. М., «Наука», 1971, 894 с.
27. Переходные процессы и вопросы устойчивости в электрических системах. Сб. переводов под ред. В. А. Веникова. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957. 136 с.
28. Цукерник Л. В. Анализ матрицы коэффициентов уравнений возмущенного движения сложной энергетической системы и определение порядка характеристического уравнения.— «Труды ИЭ АН УССР», вып. 16, Киев, Изд. АН УССР, 1959, с. 21—54.

[13.9.1973]



УДК 621.311.003.13

Надежность, качество энергии и экономичность функционирования энергетического предприятия¹

МОСКАЛЕВ А. Г.

Москва

Основные положения и зависимости. Надежность снабжения энергией потребителей, качество поставляемой им энергии и экономичность работы энергообеспечивающего предприятия являются важнейшими категориями их функционирования.

Известно, что изменение качества поставляемой энергии и надежности энергоснабжения потребителей влияет на экономичность функционирования энергетического предприятия. Однако остается открытым вопрос о виде и количественной мере упомянутых зависимостей, а без этого не представляется возможным выбирать экономически оптимальные (наилучшие) значения надежности оборудования и сооружений энергетических предприятий и качества поставляемой потребителям энергии, правильно устанавливать нормативы по надежности энергоснабжения и качеству энергии, а также правильно распределять материальные вложения в отдельные объекты энергетических предприятий, т. е. в электростанции и сети.

Имеющую место объективную зависимость между упомянутыми категориями можно установить путем разработки математической технико-экономической модели энергетического предприятия, связывающей показатели экономичности, надежности и качества. Разработка модели заключается в том, чтобы, во-первых, правильно выбрать основной (критериальный) показатель экономической эффективности, во-вторых, из большого числа показате-

лей надежности и качества выбрать такие обобщенные показатели, которые в наибольшей степени влияют на экономичность функционирования предприятия и, в-третьих, выбрать такие функции связи между показателями разных категорий (модели), которые наилучшим образом отражают имеющие место реальные зависимости между ними. Такая постановка вопроса в отношении надежности и экономичности полностью соответствует задаче теории надежности [Л. 1, стр. 83].

В настоящее время в качестве планового и оценочного показателя экономической эффективности предприятия принята рентабельность (норма рентабельности, уровень рентабельности [Л. 2—4]), а именно:

для функционирующего предприятия

$$E = \frac{П}{C_{\Phi}} = \frac{Д - И}{C_{\text{осн}} + C_{\text{об}}}; \quad (1)$$

для проектируемого (планируемого) предприятия

$$E = \frac{П}{K} = \frac{Д - И}{K}, \quad (1a)$$

где $П$ — годовой размер прибыли; C_{Φ} — стоимостное выражение производственных фондов (основных $C_{\text{осн}}$ и оборотных $C_{\text{об}}$); $Д$ — годовая стоимость (реализованной) продукции; $И$ — издержки предприятия за год (себестоимость годового выпуска продукции); K — сумма всех капитальных вложений в предприятие.

¹ В порядке обсуждения.

В соответствии с ГОСТ 13377-67 под надежностью понимается свойство объекта (системы, предприятия, элемента) выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели — показатели производительности, экономичности, рентабельности и другие — в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

На этом основании в качестве обобщенного показателя надежности энергетических предприятий примем коэффициент бесперебойности энергоснабжения k_b , а в качестве исходных показателей надежности — коэффициент бесперебойности функционирования канала энергоснабжения $k_{б.ф.к.}$, коэффициент технического использования канала $k_{т.и.к.}$ и коэффициент ограничения энергоснабжения канала $k_{огр.к.}$, определяемые как [Л. 5]:

$$k_b = \left(\sum_{i=1}^m k_{б.ф.к. i} D_{э.к. i} \right) / \left(\sum_{i=1}^m D_{э.к. i} \right); \quad (2)$$

$$k_{б.ф.к.} = k_{т.и.к.} - k_{огр.к.}; \quad (3)$$

$$k_{огр.к.} \approx \frac{D_{нд.огр.к.}}{D_{ф.к.} - D_{нд.огр.к.}}, \quad (4)$$

где $D_{э.к. i}$ — стоимость энергии, переданной по i -му каналу энергоснабжения за год; m — число каналов энергоснабжения в предприятии; $D_{нд.огр.к.}$ — стоимость энергии, недоотпущенной по каналу за год в периоды времени, когда вводились ограничения выдачи (передачи) энергии (исключая случаи недоотпуска из-за недостатка энергоносителя); $D_{ф.к.}$ — стоимость фактически выданной (переданной) энергии за год по каналу.

Здесь под каналом энергоснабжения понимается вся совокупность элементов (в том числе параллельные ВЛ), по которым энергия подается от энергопредприятий к данному потребителю.

В ГОСТ 16431-70 в качестве обобщенных показателей качества продукции предусмотрены коэффициент сортности продукции, определяемый через цены на продукцию разных сортов, и индекс качества продукции, определяемый через эффективность действия продукции. Так как в настоящее время цена на энергию не зависит от ее качества (сорта), то для оценки качества энергии примем индекс качества энергии, определяемый как среднее взвешенное значение относительных показателей качества энергии различных видов и параметров:

$$u_{к.э} = \left(\sum_{i=1}^m k_{эф.к. i} \mathcal{E}_{к. i} \right) : \left(\sum_{i=1}^m \mathcal{E}_{к. i} \right), \quad (5)$$

где $k_{эф.к. i}$ — коэффициент эффективности энергии, переданной по i -му каналу энергоснабжения; $\mathcal{E}_{к. i}$ — количество энергии, переданной по i -му каналу энергоснабжения за год.

Коэффициент эффективности энергии, переданной по каналу, определим по ее эффективному действию $W(\mathcal{E}_k)$ в контрольном (среднем) приемнике по сравнению с таковым при энергии эталонного качества (с номинальными параметрами) $W(\mathcal{E}_{эт.к.})$:

$$k_{эф.к.} = [W(\mathcal{E}_k)] : [W(\mathcal{E}_{эт.к.})]. \quad (6)$$

Таким образом, задача заключается в том, чтобы выявить зависимость нормы рентабельности однородных энергетических предприятий от коэффициента бесперебойности энергоснабжения (данными предприятиями) и индекса качества энергии, поставляемой данными предприятиями потребителям.

Упомянутые выше объективные зависимости нормы рентабельности от надежности и качества имеют место только в экономически замкнутых системах, т. е. в таких объектах (предприятиях, объединениях, ведомствах), в которых совпадают границы системы средств труда и системы экономического управления. Иначе говоря, данные зависимости существуют только для объектов, находящихся на полном хозяйственном расчете². Для решения поставленной задачи рассмотрим математические модели зависимости стоимостного выражения производственных фондов ($C_{осн.}$, $C_{об}$), стоимости (реализованной) энергии D и издержек I от коэффициента бесперебойности энергоснабжения и индекса качества энергии. Заметим, что последние модели имеют место как для замкнутых, так и для разомкнутых систем (объектов). Известно, что для создания более надежного объекта одного и того же назначения при одном и том же уровне техники требуется в него вложить больше сил и средств (ресурсов).

Для иллюстрации рассмотрим такой пример. При прочих оптимальных условиях ВЛ на деревянных пропитанных опорах имеет более высокую надежность и более высокую удельную стоимость, чем ВЛ на деревянных непропитанных опорах. В свою очередь, ВЛ на металлических нержавеющих опорах имеет более высокую надежность и удельную стоимость, чем ВЛ на деревянных пропитанных опорах.

Следует заметить, что сколько бы ни вкладывали в объект ресурсов, не представляется возможным создать его с абсолютной надежностью, т. е. с $k_{б.ф.} = 1$. С другой стороны, не заверченный полностью объект может иметь надежность, равную нулю при его стоимости, отличной от нуля. Известно также, что начальная стоимость объекта для выпуска энергии пониженного качества против оптимального, в общем случае, при прочих равных условиях меньше, чем стоимость объекта для выпуска энергии эталонного качества, например, за счет снижения пропускной способности и отказа от регулирующих устройств или упрощения последних.

Описанная выше зависимость начальной стоимости объекта от его показателя надежности и индекса качества выпускаемой энергии может быть представлена следующей математической моделью:

$$C_{осн.н} = \frac{C_{п.эт} + \frac{C_{о.эт}}{1 - k_b^p}}{s_1 (1 - u_{к.э}) + s_2 (1 - u_{к.э})}, \quad (7)$$

² Так, например, в Минэнерго СССР такими объектами являются Районные (главные производственные) энергетические управления. Отдельные электростанции и «электрические сети» не являются замкнутыми системами, так как не могут иметь прибыль, представляющую собой числитель основных уравнений (1) и (1а). В других министерствах «электрические сети» иногда являются замкнутыми системами.

где $C_{0.э.т}$, $C_{п.э.т}$ — параметры модели — составляющие начальной стоимости средств труда объекта при эталонном качестве энергии; ρ , s_1 , s_2 — параметры модели объекта.

Благодаря наличию в данной модели пяти параметров имеются необходимые условия для выражения зависимости начальной стоимости от коэффициента бесперебойности энергоснабжения и индекса качества энергии с достаточной степенью точности в практически важной области значений упомянутых показателей.

На основании модели (7) можно написать следующие выражения:

$$C_{осн.н} = \left(C_{п.э.т} + \frac{C_{0.э.т}}{1 - k_0^p} \right) k_k = C_{п.э.т} + \frac{C_0}{1 - k_0^p}; \quad (8)$$

$$k_k = \frac{1}{s_1^{(1-u_{к.э})} + s_2(1-u_{к.э})}; \quad (9)$$

$$C_{осн.н} = \frac{C_{осн.н.э.т}}{s_1^{(1-u_{к.э})} + s_2(1-u_{к.э})}; \quad (10)$$

$$C_{осн.н.э.т} = C_{п.э.т} + \frac{C_{0.э.т}}{1 - k_0^p}, \quad (11)$$

где $C_{п.э.т}$, C_0 — параметры модели при данном индексе качества энергии.

Уравнение (8) выражает зависимость стоимости средств труда от коэффициента бесперебойности энергоснабжения при данном индексе качества энергии и поэтому представляет собой стоимостную характеристику надежности (средств труда) объекта. Ее общий вид приведен на рис. 1,а (кривые 1 и 2). Данная характеристика существенно необходима для правильного выбора надежности объекта.

Уравнение (9) представляет собой коэффициент стоимости, учитывающий снижение стоимости объекта для выпуска энергии пониженного качества против эталонного. Для объекта, предназначенного выпускать энергию эталонного качества, он равен единице. Общий вид данной зависимости приведен на рис. 1,б.

Уравнение (10) выражает зависимость стоимости средств труда от индекса качества энергии и может быть названо стоимостной характеристикой средств труда объекта по качеству энергии. Ее внешний вид аналогичен кривой, приведенной на рис. 1,б. Данная характеристика существенно необходима для правильного выбора качества поставляемой потребителям энергии.

С достаточной для практических расчетов степенью точности можно принять, что между надежностью средств труда и качеством поставляемой энергии, с одной стороны, и стоимостным выражением оборотных фондов, с другой стороны, отсутствует корреляционная связь.

Годовая стоимость (реализованной) продукции энергопредприятия, в общем случае, представляет собой сумму стоимостей, полученных за поставку энергии $D_э$ и за прочую продукцию $D_{пр}$, включая выполнение услуг:

$$D = D_э + D_{пр}.$$

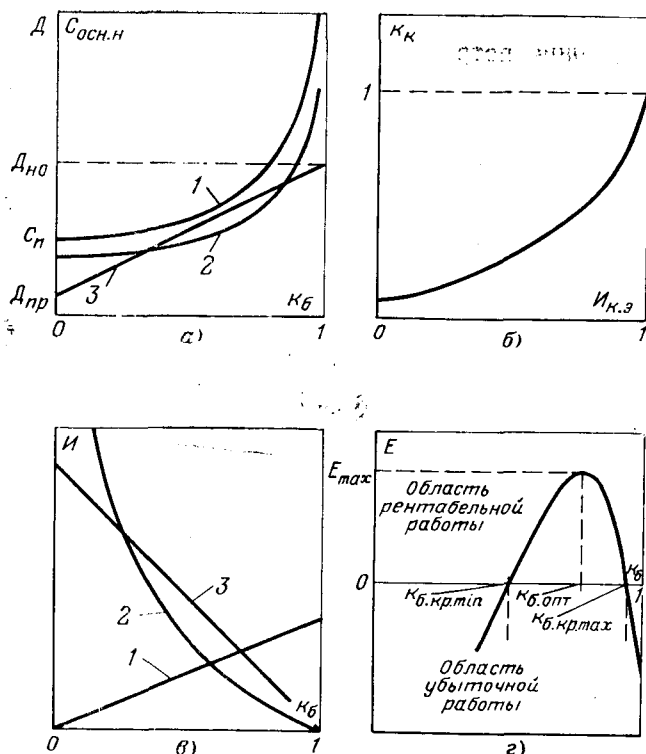


Рис. 1. Общий вид экономических характеристик надежности и качества энергетического предприятия.

а — зависимость стоимости реализованной энергии и средств труда от ненадежности последних: 1 — стоимости средств труда при $k_k=1$; 2 — стоимости средств труда при $k_k<1$; 3 — стоимости реализованной энергии за год; б — зависимость коэффициента стоимости k_k от индекса качества энергии, поставляемой потребителям при неизменной надежности его средств труда: 1 — на топливо, энергию и материалы; 2 — на ремонт; 3 — на выплату потребителям компенсации за недостаточную надежность энергоснабжения; в — экономическая характеристика надежности энергоснабжающего предприятия.

Стоимость (реализованной за год) энергии может быть представлена в виде следующей суммы линейных функций коэффициентов бесперебойности функционирования каналов:

$$D_э = \sum_{i=1}^m k_{б.ф.ки} D_{э.н.oi}, \quad (12)$$

где $D_{э.н.oi}$ — стоимость энергии, которая могла быть реализована по i -му каналу при отсутствии отключений и ограничений в энергоснабжении потребителей; m — число каналов энергоснабжения в энергопредприятии.

С учетом последних выражений, а также (2), годовая стоимость (реализованной) продукции может быть представлена так:

$$D = k_0 D_{э.н.о} + D_{пр}, \quad (13)$$

где $D_{э.н.о}$ — стоимость энергии, которая могла быть реализована по всем каналам при отсутствии ограничений потребителей.

Себестоимость годового выпуска энергии определяется издержками на приобретение топлива, энергии и материалов $I_{см}$, на ремонт средств труда (включая стоимость заработной платы ремонтного персонала) $I_{р}$, на взносы в фонд восстановления (на реновацию) $I_{в}$, на плату за фонды $I_{ф}$, на заработную плату обслуживающему персоналу $I_{з}$, на

компенсацию за недостаточную надежность энергоснабжения потребителей Y_n , на компенсацию за поставку потребителям энергии сниженного качества Y_k , на дополнительные текущие издержки I_d , т. е. определяется уравнением:

$$I = I_{cm} + I_p + I_v + I_{\phi} + I_z + Y_n + Y_k + I_d. \quad (14)$$

Издержки на топливо, энергию, материалы в первом приближении могут быть приняты пропорциональными коэффициенту бесперебойности энергоснабжения энергетического предприятия (см. кривую 1 на рис. 1, в):

$$I_{cm} = k_6 I_{cmo}, \quad (15)$$

где I_{cmo} — стоимость топлива, энергии и материалов франко-энергопредприятие при $k_6 = 1$.

Издержки на ремонт средств труда зависят от их надежности. Так, например, абсолютно надежные средства труда ($k_6 = 1$) ремонтировать не нужно. В данном случае стоимость издержек на ремонт будет равна нулю. Если целью ремонта является поддержание средств труда с первоначальной надежностью, то для объектов, имевших более низкую начальную надежность, относительная стоимость ремонтов будет больше, чем для объектов с более высокой начальной надежностью. В данном случае относительные издержки на ремонт в зависимости от надежности могут быть представлены следующей математической моделью:

$$I_p = k_p \frac{1 - k_6^\sigma}{k_6^\pi} C_{осн.н} = k_p \frac{1 - k_6^\sigma}{k_6^\pi} \left(C_n + \frac{C_o}{1 - k_6^p} \right), \quad (16)$$

где k_p , σ , π — параметры математической модели ремонтпригодности средств труда (объекта).

Величина k_p в общем случае является функцией не только вида средств труда, но также и времени функционирования. Однако ввиду того, что здесь задача рассматривается в пределах одного года функционирования, зависимость k_p от срока функционирования не исследуется.

Зависимость издержек на ремонт средств труда от коэффициента бесперебойности энергоснабжения назовем стоимостной характеристикой ремонтпригодности (средств труда). Ее общий вид приведен на рис. 1, в (кривая 2).

Как известно, отчисления в фонд восстановления должны быть прямо пропорциональны значению основных производственных фондов и обратно пропорциональны нормированному сроку службы, выраженный числом лет:

$$I_v = \frac{C_{осн.н}}{N}, \quad (17)$$

где N — среднее взвешенное по стоимости значение нормированного срока службы средств труда предприятия.

Ежегодный размер платы за фонды пропорционален их начальной стоимости и нормативному коэффициенту платы за фонды k_{ϕ} :

$$I_{\phi} = k_{\phi} C_{осн.н}. \quad (18)$$

Примем, что издержки на зарплату обслуживающему персоналу, а также дополнительные текущие

издержки не зависят от надежности средств труда и качества поставляемой потребителям энергии.

В соответствии с действующими положениями [Л. 3] при определении как абсолютной экономической эффективности (нормы рентабельности), так и сравнительной экономической эффективности (приведенных затрат) в издержки может быть включено только то, что входит составной частью в себестоимость. В силу этого в общую формулу издержек (14) ни при каких обстоятельствах не могут быть включены в полном объеме так называемые ущербы у потребителей (исключая случаи арбитражного разбирательства), возникающие у них при недостаточной надежности энергоснабжения и поставках энергии сниженного качества. В формулу издержек (14) должна включаться только та часть общих ущербов, которая компенсируется энергоснабжающим предприятием.

Материальные (финансовые) взаимоотношения между энергоснабжающим предприятием и потребителями регламентируются Правилами пользования электрической и тепловой энергией [Л. 6]. В соответствии с ними энергоснабжающая организация выплачивает потребителям компенсацию в размере α -кратной стоимости недоотпущенной энергии на производственные нужды. Издержки энергоснабжающей организации, связанные с данными платежами, могут быть выражены следующей функцией:

$$Y_n = \alpha (1 - k_6) k_{np} D_{э.но}, \quad (19)$$

где k_{np} — коэффициент, равный отношению стоимости энергии, поставленной потребителям на производственные нужды, к общей стоимости реализованной энергии.

Согласно [Л. 6] энергоснабжающая организация выплачивает потребителям компенсацию в размере β -кратной стоимости энергии, отпущенной потребителям на производственные нужды с показателями качества ниже установленной нормы. Издержки энергоснабжающей организации, вызванные данными платежами, могут быть представлены следующей функцией:

$$Y_k = \beta (1 - u_{к.э}) k_{np} D_{э.но}. \quad (20)$$

Как сказано в [Л. 6 п. 81а], выплатой данных компенсаций исчерпываются все претензии потребителей к энергоснабжающему предприятию.

С учетом (1), (8), (9), (13) — (20) связь между надежностью средств труда энергоснабжающего предприятия, качеством поставляемой им энергии и его рентабельностью функционирования имеет следующий вид:

$$E = \left\{ (D_{э.но} - I_{cmo}) k_6 - [\alpha (1 - k_6) + \beta (1 - u_{к.э}) k_6] k_{np} D_{э.но} - (I_z + I_d - D_{np}) - \left(k_p \frac{1 - k_6^\sigma}{k_6^\pi} + \frac{1}{N} + k_{\phi} \right) \left(C_{п.эт} + \frac{C_{о.эт}}{1 - k_6^p} \right) \right\} : \left\{ C_{п.эт} + \frac{C_{о.эт}}{1 - k_6^p} + C_{об} [s_1^{(1 - u_{к.э})} + s_2 (1 - u_{к.э})] \right\}. \quad (21)$$

Последнее выражение представляет собой основную экономическую характеристику (надежности и качества продукции) функционирования энергети-

ческого предприятия. Графическое выражение этой характеристики имеет вид выпуклой поверхности в системе координат: k_6 , $u_{к.э}$, E . Вершина выпуклой поверхности, возвышающейся над плоскостью основания, образованной координатами k_6 и $u_{к.э}$, соответствует максимуму нормы рентабельности энергопредприятия $E_{\max}$, экономически оптимальному значению коэффициента бесперебойности энергоснабжения $k_{6, \text{опт}}$ и экономически оптимальному значению индекса качества энергии, поставляемой потребителям $u_{к.э, \text{опт}}$.

При $u_{к.э} = \text{const}$ (21) вырождается в основную экономическую характеристику надежности предприятия, определяемую так:

$$E = \left\{ (D_{э.н0} - I_{см0}) k_6 - [\alpha(1 - k_6) + \beta(1 - u_{к.э.з}) k_6] k_{нр} D_{э.н0} - (I_з + I_д - D_{нр}) - \left(k_p \frac{1 - k_6^2}{k_6^2} + \frac{1}{N} + k_\phi \right) \left(C_{н*} + \frac{C_0}{1 - k_6^2} \right) \right\} : \left(C_{н*} + \frac{C_0}{1 - k_6^2} + C_{об*} \right). \quad (22)$$

где $u_{к.э.з}$ — заданное (фактическое) значение индекса качества энергии.

При $k_6 = \text{const}$ функция (21) вырождается в экономическую характеристику качества энергии энергопредприятия.

Для проектируемых (планируемых) объектов вместо уравнения (1) принимается (1а), в котором $K = C_{осн} + C_{об}$.

Основная экономическая характеристика надежности предприятия представляет собой выпуклую кривую относительно оси коэффициентов бесперебойности (рис. 1,2). Она имеет следующие три характерные точки.

Первая точка, находящаяся на вершине выпуклой кривой, соответствует максимальному значению нормы рентабельности $E_{\max}$ и, следовательно, оптимальному значению коэффициента бесперебойности энергоснабжения $k_{6, \text{опт}}$.

Вторая точка соответствует значению нормы рентабельности, равной нулю, и минимальному критическому значению коэффициента бесперебойности энергоснабжения $k_{6, \text{кр. мин}}$.

Третья точка соответствует также значению нормы рентабельности, равной нулю, и максимальному критическому значению коэффициента бесперебойности энергоснабжения $k_{6, \text{кр. макс}}$. При повышении надежности средств труда сверх максимальной критической энергопредприятие перейдет в область убыточной работы.

Экономические характеристики надежности предприятий распределительных электрических сетей. Ниже приводятся результаты определения параметров упомянутых выше математических моделей и соответствующих им характеристик надежности для предприятий распределительных электрических сетей Главсельэнерго Министерства энергетики и электрификации Украинской ССР по результатам их функционирования за 1969 г., когда они находились на полном хозяйственном расчете.

В настоящее время параметры каждой математической модели принято определять независимо. Однако, если в общую систему уравнений, которой описывается исследуемая система, входят несколько математических моделей, то при независимом определении параметров последних возрастает погрешность при использовании данных моделей для расчетов системы. В силу этого, крайне желательно, если имеется возможность, определять параметры всех моделей одной системы из решения одной системы уравнений по наблюдаемым значениям показателей категорий функционирования исследуемой системы.

В данном случае для этого имелись необходимые условия в виде аналитического выражения показателя критериальной величины, значений обобщенных показателей функционирования системы для ряда «точек наблюдения» и метода решения систем нелинейных уравнений [Л. 7 и 8].

Чтобы одними и теми же математическими моделями можно было пользоваться для предприятий различной производительности (пропускной способности) все параметры первых должны быть выражены в относительных единицах путем деления числителей и знаменателей выражений (8), (16) на стоимость энергии $D_{э.н0}$. Тогда выражение для основной экономической характеристики надежности примет следующий вид:

$$E = \left\{ (1 - I_{см0*}) k_6 - [\alpha(1 - k_6) + \beta(1 - u_{к.э.з}) k_6] k_{нр} - (I_{з*} + I_{д*} - D_{нр*}) - \left(k_p \frac{1 - k_6^2}{k_6^2} + \frac{1}{N} + k_\phi \right) \left(C_{н*} + \frac{C_{0*}}{1 - k_6^2} \right) \right\} : \left(\frac{C_{0*}}{1 - k_6^2} + C_{н*} + C_{об*} \right), \quad (23)$$

где $I_{см0*}$, $I_{з*}$, $I_{д*}$, $D_{нр*}$, $C_{н*}$, C_{0*} , $C_{об*}$ получены как частное от деления соответственно $I_{см0}$, $I_з$, $I_д$, $D_{нр}$, $C_{н}$, C_0 , $C_{об}$ на $D_{э.н0}$.

Параметры моделей C_{0*} , $C_{н*}$, ρ , σ , π , k_p при известных значениях величин функционирования k_6 , $I_{см0*}$, $I_{з*}$, $I_{д*}$, $D_{нр*}$, N , k_ϕ , $C_{об*}$ всех обследованных предприятий определялись по методу наименьших квадратов³.

Как известно, надежность энергоснабжающего предприятия зависит не только от исходных номинальных характеристик элементов его средств труда, но также и от географическо-климатических условий, в которых они функционируют. Так, предприятия, имеющие средства труда с одинаковыми физическими свойствами и запасами прочности, но расположенные в разных географическо-климатических зонах, будут иметь разные коэффициенты бесперебойности энергоснабжения, т. е. разную надежность. Как следует из (22), экономичность функционирования предприятия зависит не только от степени надежности его средств труда и качества поставляемой потребителям энергии, но также от

³ В обработке информации принимали участие С. В. Корбанов, Т. С. Шакало, Ю. Н. Астахов, Л. Ф. Столярова.

Таблица 1

Степень загрузки электрических сетей, <i>Мвт·ч/км·г</i>	Группы энергопредприятий по их признакам			
	Географическо-климатические зоны			
	степная	лесостепная	полесская	предгорная
$\xi < 35$	1	5	9	13
$35 \leq \xi < 70$	2	6	10	14
$70 \leq \xi < 140$	3	7	11	15
$140 \leq \xi$	4	8	12	16

степени загрузки оборудования (сооружений) и структуры потребляемой энергии по тарифам. Поэтому для определения экономических характеристик надежности все предприятия распределительных электрических сетей целесообразно делить на четыре категории по следующим признакам: географическо-климатическому району; степени загрузки электрических сетей; среднему тарифу на электроэнергию; качеству поставляемой потребителям электроэнергии.

По первому признаку анализировавшиеся предприятия были разделены на четыре группы: расположенные, соответственно в степной, лесостепной, полесской и предгорной зонах.

По второму признаку все предприятия были разделены также на четыре группы по степени загрузки ВЛ 6—10 кв:

до 35 *Мвт·ч* на километр в год исключительно, от 35 до 70 *Мвт·ч* на километр в год исключительно,

от 70 до 140 *Мвт·ч* на километр в год исключительно,

от 140 *Мвт·ч* на километр в год и выше.

По третьему и четвертому признакам все энергопредприятия были отнесены к одной группе.

В соответствии с вышеизложенным все предприятия распределительных электрических сетей Главсельэнерго были разделены на 16 групп, каждая из которых характеризуется определенной категорией климатического района и определенной степенью загрузки линий электропередачи (табл. 1).

Значения экономических параметров предприятий D , $I_{см}$, I_z , I_d , N , k_f , $C_{об}$, $C_{осп.л}$, $k_{пр}$, E , а также суммарное количество реализованной энергии и средние тарифы были взяты из годовых отчетов предприятий. Схемы электрических сетей и их параметры были приняты по данным технических отде-

Таблица 2

Группы предприятий электрических сетей	Параметры моделей					
	C_{0*}	$C_{п*}$	ρ	σ	π	k_p
Первая	3,8821	-1,0293	103,18	4,3829	108,01	0,25681
Вторая	4,0293	-0,82323	314,05	4,8088	109,98	0,20224
Третья	3,1000	-0,65074	411,28	2,4935	153,51	0,26072
Шестая	4,8567	-0,81654	403,32	2,5123	158,50	0,19888
Седьмая	3,0000	-0,89604	372,14	2,5734	175,19	0,97139
Девятая	3,6347	-0,90470	137,72	4,0720	108,36	0,22704
Десятая	3,6404	-0,95169	258,17	1,8394	103,11	0,96278

Таблица 3

Группы предприятий электрических сетей	Коэффициенты бесперебойности энергоснабжения			Ширина зоны коэффициентов бесперебойности энергоснабжения, соответствующая рентабельной работе предприятия
	оптимального	минимального критического	максимального критического	
Первая	0,9888	0,9825	0,9965	0,0140
Вторая	0,9915	0,9819	0,9985	0,0166
Третья	0,9921	0,9818	0,9991	0,0173
Шестая	0,9927	0,9842	0,9989	0,0147
Седьмая	0,9939	0,9880	0,9992	0,0112
Девятая	0,9886	0,9798	0,9983	0,0185
Десятая	0,9916	0,98395	0,99875	0,0148

лов предприятий, а информация об отключениях была получена из оперативных журналов.

Для определения параметров моделей (табл. 2) были составлены семь систем нелинейных уравнений (по числу групп), в каждой из которых по шесть уравнений. Данные системы уравнений решались по методу, изложенному в [Л. 7 и 8], на ЦВМ.

Подставив в уравнения (22) и (23) значения параметров модели данной группы, а также значения экономических параметров (D , $I_{см}$, I_z и т. д.) одного из энергопредприятий данной группы получим уравнение основной экономической характеристики надежности данного предприятия. Если в уравнения (22) и (23) подставить средние взвешенные по стоимости энергии значения экономических параметров предприятий данной группы, то получим уравнение средней характеристики данной группы, которую назовем нормальной основной экономической характеристикой надежности предприятий этой данной группы.

Нормальные основные экономические характеристики надежности предприятий распределительных сетей 1, 2, 3, 9 и 10-й групп приведены на рис. 2 и 3.

Критерием правильности выбора нелинейной модели является чередование знаков погрешности при значениях аргумента, соответствующих точкам наблюдения. Все модели удовлетворяют данному критерию.

Точность нелинейной модели может быть охарактеризована математическим ожиданием погрешности. Последнее составляет 0,099, что вполне приемлемо для таких расчетов.

Оптимальные и критические значения коэффициентов бесперебойности энергоснабжения, а также ширина зоны коэффициентов бесперебойности энергоснабжения, соответствующая рентабельной работе, приведены в табл. 3. Из нее следует, что повышение значения коэффициента бесперебойности энергоснабжения сверх 0,9965—0,9992 (для разных групп предприятий), а также снижение за пределы 0,9886—0,9939 ведет к убыточной работе предприятий распределительных электрических сетей.

Оптимальные значения начальной стоимости средств труда (основных производственных фондов) предприятия для рассматриваемых предприятий, значения нормы рентабельности предприятий при оптимальной надежности средств труда приведены в табл. 4.

Таблица 4

Группы предприятий электрических сетей	Норма рентабельности, начальная стоимость средств труда и издержки на ремонты в относительных единицах при оптимальном значении коэффициента бесперебойности энергоснабжения			
	Норма рентабельности	Начальная стоимость средств труда, отнесенная к стоимости реализованной энергии	Издержки на ремонты	
			отнесенные к стоимости реализованной энергии	отнесенные к начальной стоимости средств труда
Первая	0,0477	4,86	0,1758	0,0361
Вторая	0,0908	3,50	0,0729	0,0350
Третья	0,1612	2,57	0,0444	0,0173
Шестая	0,0767	4,31	0,0500	0,0116
Седьмая	0,1563	2,45	0,1050	0,0444
Девятая	0,0895	3,67	0,1318	0,0359
Десятая	0,1054	3,15	0,1116	0,0354

Из стоимостных характеристик надежности средств труда (рис. 2 и 3) следует, что при повышении значения показателя надежности средств

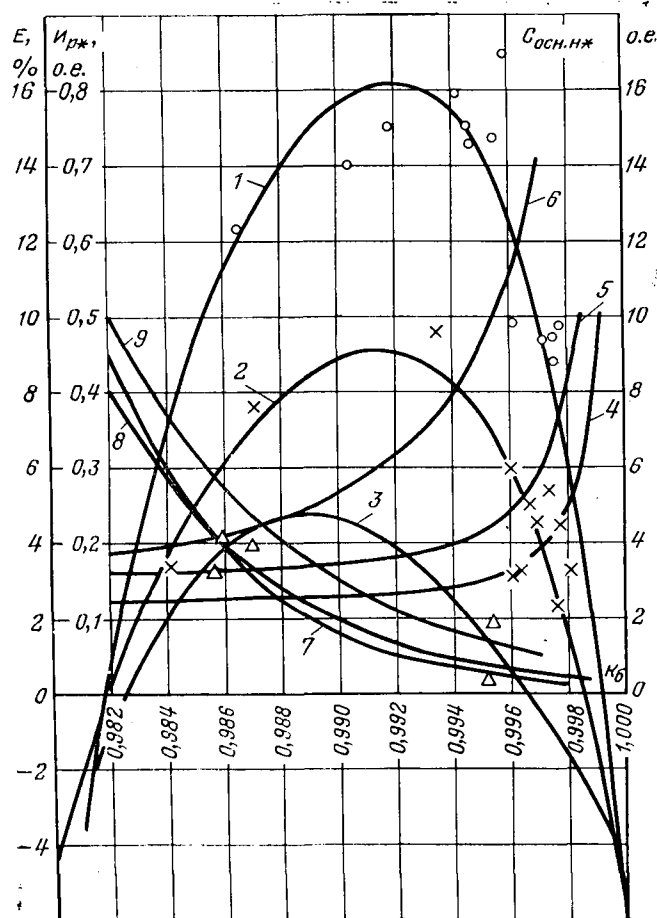


Рис. 2. Нормальные экономические характеристики надежности предприятий распределительных электрических сетей, расположенных в степной зоне.

3, 6, 9 — при степени загрузки ВЛ до 35 Мвт·ч в год; 2, 5, 8 — при степени загрузки ВЛ от 35 до 70 Мвт·ч в год; 1, 4, 7 — при степени загрузки ВЛ от 70 до 140 Мвт·ч в год; 1, 2, 3 — основная экономическая характеристика надежности; 4, 5, 6 — стоимостная характеристика надежности средств труда; 7, 8, 9 — стоимостная характеристика ремонтнопригодности средств труда;

○, ×, △ — относятся соответственно к кривым 1, 2, 3.

труда от оптимального до максимального критического начальная стоимость средств труда возрастает в 2,5—4,5 раза против оптимальной; при этом норма рентабельности предприятия снижается до нуля.

Следует отметить, что среди рассмотренных предприятий только 25% имели надежность и норму рентабельности, близкие к оптимальным; 20% предприятий имели надежность, близкую к максимально критической, а следовательно, имели норму рентабельности, близкую к нулю. Последние предприятия явно переусердствовали в повышении надежности электроснабжения.

Значения издержек на ремонты при оптимальной надежности средств труда представляют собой оптимальные значения стоимости ремонтов (табл. 4). Из стоимостных характеристик ремонтнопригодности (рис. 2 и 3) следует, что с повышением надежности средств труда от оптимальной до максимальной критической необходимый размер издержек на ремонты уменьшается в 8—40 раз.

Численные значения параметров экономических характеристик надежности зависят не только от цены на оборудование и материалы, но также от покупной и продажной цены на энергию. Для рассматриваемых предприятий среднее значение покупной и продажной цены соответственно 0,4 и 2,0 коп. за киловатт-час.

Выводы. 1. Связь между надежностью средств труда предприятия, качеством поставляемой им

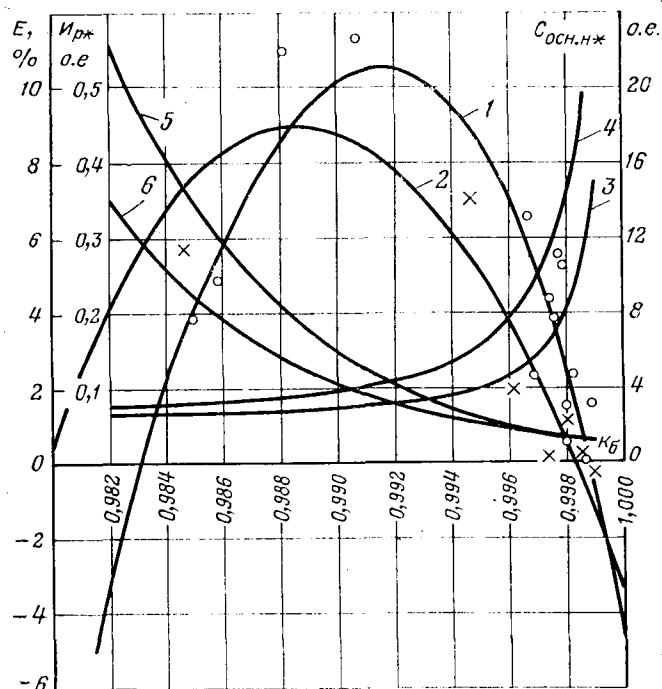


Рис. 3. Нормальные экономические характеристики надежности предприятий распределительных электрических сетей, расположенных в полесской зоне.

1 и 2 — основные экономические характеристики надежности предприятий соответственно десятой и девятой групп; 3 и 4 — стоимостные характеристики надежности средств труда предприятий соответственно десятой и девятой групп; 5 и 6 — стоимостные характеристики ремонтнопригодности средств труда предприятий соответственно десятой и девятой групп;

○, × относятся соответственно к кривым 1, 2.

энергии и его экономичностью функционирования может быть представлена математической моделью, описывающей основную экономическую характеристику функционирования энергопредприятия. Из нее могут быть получены основная экономическая характеристика надежности и основная экономическая характеристика качества энергии.

2. Степень зависимости рентабельности функционирования энергопредприятий от надежности их средств труда очень высока и уже при незначительных отклонениях надежности от оптимальных значений предприятие переходит из области прибыльной в область убыточной работы. Поэтому нельзя допускать повышения надежности средств труда (качества поставляемой энергии) против оптимальной за счет увеличения капитальных вложений и издержек на ремонт, если это не вызывается необходимостью сохранения жизни и здоровья людей, флоры и фауны.

3. Максимально возможные значения нормы рентабельности энергопредприятий различных групп отличаются существенно (между некоторыми группами в несколько раз) и колеблются от 4,77 до 16,2%. Поэтому недопустимо при расчетах экономической эффективности для всех предприятий принимать одинаковый коэффициент экономической эффективности, равный 0,12.

4. Оптимальное значение коэффициента бесперебойности энергоснабжения для различных групп рассмотренных предприятий распределительных электрических сетей находится в пределах от 0,9886 до 0,9939.

5. Связь между стоимостью средств труда однородных предприятий и их надежностью может быть представлена в виде математической модели, описывающей стоимостную характеристику надежности средств труда. Из нее следует, что для рассмотренных энергопредприятий повышение надежности от оптимальной до максимальной критической (на 0,005—0,010 относительных единиц) влечет за собой удорожание стоимости средств труда (повышение основных производственных фондов) предприятия в 2—4 раза, т. е. ведет к существенно излишним капитальным вложениям.

6. Согласно стоимостной характеристики ремонтпригодности, выражающей зависимость издержек на ремонт средств труда от их надежности, в правильно спроектированном и сооруженном предприятии с повышением его надежности относительное значение отчислений на ремонт должно сокращаться. Принятый в настоящее время принцип определения необходимых средств на ремонты не согласуется с приведенными выше экономическими характеристиками надежности.

7. Рассмотренные выше распределительные электрические сети спроектированы и сооружены не с оптимальной надежностью, что привело к повышению капитальных вложений против оптимального значения примерно на 25% и к снижению общего объема получаемой предприятиями прибыли примерно на 40%.

8. Только зная экономические характеристики надежности и не делая ошибки в выборе критерия оптимальности, можно создавать оптимальные по надежности и экономичности энергетические предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М., «Наука», 1965.
2. Политическая экономия. М., Изд-во политической литературы, 1970.
3. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений.— «Экономическая газета», 1969, № 39.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. М., «Энергия», 1968.
5. Москалев А. Г. Выступление в дискуссии.— «Электричество», 1974, № 1.
6. Правила пользования электрической и тепловой энергией. М., «Энергия», 1970.
7. Москалев А. Г. Обобщенный метод решения оптимальных задач.— В сб.: Выбор состава работающего оборудования энергосистем. Кишинев, АН МССР, 1970.
8. Москалев А. Г. Акселераторный способ процесса поиска и повышения точности решения системы уравнения.— В сб.: Разработка математического обеспечения ОАСУ «Энергия». Кишинев, «Штиинца», 1973.

[13.12.1973]



УДК 621.315.1:621.317.333.8

Исследование электрической прочности изоляции линий сверхвысокого напряжения

Доктор техн. наук АЛЕКСАНДРОВ Г. Н., инж. РЕДКОВ В. П.

Ленинградский политехнический институт

Исследованиями на макетах опор различного типа, выполненными в лаборатории сверхвысоких напряжений ЛПИ, была установлена чрезвычайно высокая электрическая прочность воздушных промежутков между проводами и опорой и ее зависимость от поперечных размеров металлоконструкций опор и от конструкции проводов, в частности, от их радиуса расщепления [Л. 1]. Перспектива при-

менения линий с существенно увеличенным радиусом расщепления [Л. 2] определила целесообразность тщательного экспериментального исследования характеристик электрической прочности таких линий. Существенное расхождение данных [Л. 1] с большинством зарубежных публикаций [Л. 3 и 4] вызвали необходимость выявления его причин. Этим двум вопросам и посвящена настоящая статья.

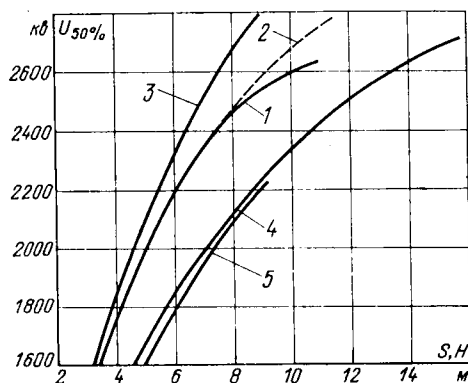


Рис. 1. Зависимости 50%-ных разрядных напряжений промежутка «провод—стойка опоры» от длины промежутка S при длине фронта импульса 350 мксек (1, 2, 4) и 3000 мксек (3, 5). 1— $U_{50\%}=f(S)$ для промежутка «провод—стойка» при $H=15$ м [Л. 4]; 2—та же зависимость при исключении влияния земли; 3— $U_{50\%}=f(S)$ при $H > 20$ м [Л. 1]; 4— $U_{50\%}=f(H)$ для промежутка «провод—земля» [Л. 4]; 5—то же по данным [Л. 6].

Приведенные в [Л. 4] данные об электрической прочности промежутка «провод—стойка опоры» хорошо согласуются с данными [Л. 1] при небольших длинах промежутков S (рис. 1). Однако при $S > 7$ м по данным [Л. 4] увеличение разрядных напряжений резко замедляется вопреки данным [Л. 1]. Это обстоятельство истолковывается рядом специалистов (в том числе и в СССР) как свидетельство достижения предела электрической прочности воздуха при напряжениях свыше 2000 кВ. Однако анализ данных [Л. 4] позволяет сделать вывод о существенной методической ошибке, приведшей к искусственному занижению разрядных напряжений. Действительно, все опыты были выполнены при неизменной высоте провода над землей $H=15$ м. При малых величинах S это обстоятельство не влияло на условия развития разряда. Однако при $S > 7$ м электрическая прочность промежутка «провод—опора» оказывается сравнимой с прочностью промежутка «провод—земля» длиной $H=15$ м (рис. 1). Очевидно, что электрическая прочность системы двух промежутков «провод—опора» и «провод—земля» не может быть выше прочности каждого из промежутков в отдельности. Поэтому увеличением промежутка S «провод—опора» нельзя достичь роста 50%-го разрядного напряжения системы U_{50} сверх величины 50%-го разрядного напряжения промежутка «провод—земля» $U_{50\%, H}$. При этом не обязательно должны наблюдаться разряды с провода на землю. Поле промежутка «провод—земля» оказывается достаточным для инициирования разряда с провода, однако дальнейший путь разряда определяется полем развивающегося лидера. Усиление поля при наличии заземленной стойки и $S < H$ должно привести в большинстве случаев к искажению пути разряда и завершению его на стойке.

Такой характер развития разряда в изоляционной системе «провод—стойка—земля» наблюдался в специально поставленных опытах на наружном испытательном стенде ЛПИ. Исследования выполнены на крайней фазе промежуточной опоры 750 кВ;

высота траверсы относительно земли 32 м, длина траверсы 40 м и поперечное сечение траверсы и стойки 1×1 м². Воздушные промежутки между проводом, траверсой и стойкой сохранялись неизменными. Макет траверсы вместе с гирляндой и проводом перемещался вдоль стойки опоры с помощью системы блоков и тросов (рис. 2), что позволяло изменять высоту провода над землей от 6 до 25 м. В верхнем положении провода передвижной макет траверсы не использовался, а гирлянда подвешивалась к траверсе опоры. Макет расщепленного провода был выполнен из четырех труб длиной около 20 м, диаметром 33 мм, расположенных в вершинах квадрата с диагональю 0,8 м (радиус расщепления 0,4 м). Трубы с обеих сторон удлинялись тонкими проволоками, сходящимися к кольцу диаметром 0,5 м. Общая длина макета провода составляла 30 м, по 15 м в обе стороны от опоры, т. е. была почти втрое больше длины испытательного промежутка «провод—опора». Концы макета провода оттягивались вверх на соседние порталы капроновыми шнурами. В результате этих мер были полностью исключены разряды с концов проводов на опору и на землю.

Гирлянда состояла из 27 стеклянных изоляторов ПС-22 со строительной высотой 20 см и длиной пути утечки 39 см.

Исследования выполнены при колебательных импульсах коммутационных перенапряжений с длиной фронта 3000 мксек при использовании каскада трансформаторов 2,25 Мв. Результаты исследований приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Из рис. 3 и табл. 1 следует, что при уменьшении расстояния до земли разрядные напряжения уменьшаются, приближаясь к разрядным напряжениям промежутка «провод—земля» (кривая 2).

Для системы двух изоляционных воздушных промежутков справедливо соотношение:

$$P_r(U) = 1 - [1 - P_s(U)][1 - P_H(U)], \quad (1)$$

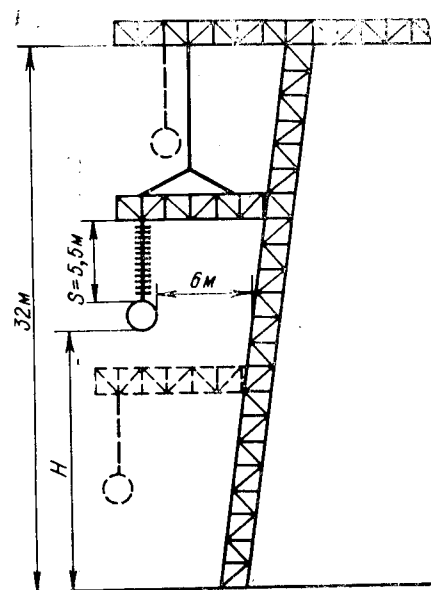


Рис. 2. Эскиз макета для исследований влияния высоты провода над землей на разрядные напряжения промежутков на опоре.

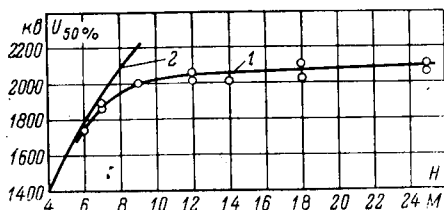


Рис. 3. Зависимость 50%-ных разрядных напряжений промежутка между проводом и опорой $S=5,5$ м от высоты провода над землей.

$1-U_{50\%}=f(H)$ при $S=5,5$ м = const; $2-U_{50\%}=f(H)$ для промежутка «провод—земля» [Л. 6].

где $P_{\Sigma}(U)$ — вероятность перекрытия системы промежутков в целом при заданной амплитуде импульса напряжения U ; $P_S(U)$ и $P_H(U)$ вероятность перекрытия промежутков «провод—опора» и «провод—земля» соответственно. После преобразования выражение (1) можно переписать в виде:

$$P_{\Sigma}(U) = P_S(U) + P_H(U) - P_S(U)P_H(U). \quad (2)$$

Поскольку кривая эффекта для воздушных промежутков аппроксимируется функцией нормального распределения [Л. 5], вероятности перекрытия промежутков записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_S(U) &= F_n\left(\frac{U - U_{50\%, S}}{\sigma_S}\right) = F_n(U, S); \\ P_H(U) &= F_n\left(\frac{U - U_{50\%, H}}{\sigma_H}\right) = F_n(U, H), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где F_n — табличная функция нормального распределения; $U_{50\%}$ и σ — 50%-ное разрядное напряжение и стандарт кривой эффекта.

При амплитуде напряжения, равной 50%-ному разрядному напряжению системы промежутков ($U = U_{50\%, \Sigma}$), выражение (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(U_{50\%, \Sigma}) &= 0,5 = F_n\left(\frac{U_{50\%, \Sigma} - U_{50\%, H}}{\sigma_H}\right) + \\ &+ F_n\left(\frac{U_{50\%, \Sigma} - U_{50\%, S}}{\sigma_S}\right) - \\ &- F_n\left(\frac{U_{50\%, \Sigma} - U_{50\%, H}}{\sigma_H}\right) F_n\left(\frac{U_{50\%, \Sigma} - U_{50\%, S}}{\sigma_S}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Таблица 1

Высота провода над землей H , м	50%-ное разрядное напряжение $U_{50\%}$, кВ	Стандарт σ , %
6	1740	7,2
7	1870	6,4
7	1890	4,1
9	2000	4,2
12	2020	6,3
12	2060	6,7
14	2010	6,1
18	2020	8,8
18	2100	5,7
25	2070	6,0
25	2110	5,7

При известных величинах $U_{50\%, \Sigma}$ и $U_{50\%, H}$ это уравнение однозначно определяет 50%-ное разрядное напряжение промежутка «провод—опора».

Поскольку в реальных условиях линии электропередачи с учетом необходимого габарита «провод—земля» и стрелы провеса провода высота провода у опоры линий сверхвысокого напряжения (и тем более линии ультравысокого напряжения) превышает 20 м уравнение (4) использовано для определения действительного значения $U_{50\%, S}$ по данным [Л. 3 и 4] о разрядных напряжениях системы промежутков «провод—опора—земля» (кривая 1, рис. 1 при $H=15$ м) и промежутка «провод—земля» (кривая 4, рис. 1).

При $H=15$ м согласно этим данным $U_{50\%, H} = 2670$ кВ. Подставляя это значение в (4), принимая $\sigma_H = 0,04U_{50\%, H}$ и $\sigma_S = 0,07U_{50\%, S}$ [Л. 4 и 5] и используя в качестве $U_{50\%, \Sigma} = f(S)$ кривую 1 на рис. 1, получаем расчетные значения $U_{50\%, S}$ (кривая 2). Как видно, недостаточная высота H привела к существенному искажению результатов испытаний при $S > 8$ м. Изменение хода кривой разрядных напряжений промежутка «провод—опора» позволяет отвергнуть предположение о наличии предела электрической прочности воздуха тем более, что такой предел для промежутка «провод—земля» по данным [Л. 4] не обнаружен.

Тем не менее сравнение кривых 2 и 3 (рис. 1) указывает на значительное расхождение данных [Л. 1 и 4]. Возможно это расхождение определяется различием формы испытательных импульсов напряжения (длина фронта импульса 350 мксек [Л. 4] и 3000 мксек [Л. 1]). Однако практически полное совпадение разрядных напряжений промежутка «провод—земля» по данным [Л. 4 и 6] при таком же различии формы импульсов позволяет предположить, что причиной расхождений указанных кривых могли быть разряды с концов проводов, предотвратить которые при $U_{50\%} > 2000$ кВ, как показали испытания в ЛПИ, очень трудно.

Таким образом, электрическая прочность воздушных промежутков на опоре при большой высоте провода над землей значительно больше, чем прочность промежутка «провод—земля» той же длины при всех исследованных длинах промежутков.

Исследования влияния конструкции провода на электрическую прочность воздушных промежутков выполнены на той же промежуточной опоре 750 кВ (крайняя фаза). Для изменения расстояния от провода до стойки точка подвеса гирлянды перемещалась вдоль траверсы. Длина гирлянды значительно превышала длину промежутка от провода до стойки, в результате чего все разряды происходили на стойку. Поскольку согласно [Л. 1] равные воздушные промежутки «провод—траверса» и «провод—стойка» равнопрочны (при одинаковых поперечных сечениях траверсы и стойки), полученные характеристики могут быть в равной степени отнесены и к промежутку «провод—траверса».

Макет провода отличался от описанного выше тем, что радиус расщепления и число составляющих изменялись в широких пределах. При увеличении радиуса расщепления для заданного класса напря-

Таблица 2

Класс напряжения $U_n, \text{кВ}$	Радиус расщепления $r_p, \text{м}$	Число составляющих n
330	0,2	2
	0,6	3
	1,0	4
500	0,25	3
	0,75	4
750	0,4	4
	0,6	5
	1,0	6

жения число составляющих n макета провода увеличивалось. При заданной величине плотности тока в проводах увеличение n определяется требованиями ограничения коронного разряда [Л. 2]. Для испытаний были приняты конструкции макета фазы ВЛ 330, 500 и 750 кВ, соответствующие плотности $j_0 = 1,0 \text{ а/мм}^2$ и постоянному отношению рабочего напряжения линии к критическому напряжению короны $U_\phi/U_k = 0,85$ (табл. 2). Составляющие расщепленного провода размещались равномерно по окружности, радиус которой равен радиусу расщепления r_p .

Исследования проводились при напряжении промышленной частоты применительно к воздействию рабочего напряжения и при имитации импульсов коммутационных перенапряжений положительной полярности с длиной фронта 3000 мксек.

Основные результаты исследований электрической прочности промежутков на опоре при коммутационных перенапряжениях приведены в табл. 3 и на рис. 4—7 в виде зависимостей $U_{50\%}$ от длины промежутка S , а также от расстояния между стойкой опоры и осью расщепленного провода S_0 .

Провод подвешивался к гирлянде таким образом, чтобы при любом количестве составляющих нижний изолятор гирлянды находился между двумя верхними составляющими расщепленного провода. Расстояние от оси провода до стойки $S_0 = S + a_k$, где a_k — расстояние от вертикальной плоскости, проведенной через ближайшую к стойке составляющую провода до оси провода. Это расстояние определяется из выражения:

$$a_k = r_p \sin \frac{\pi}{n} [1 + 2(k-1)], \quad (5)$$

где k — порядковый номер составляющей провода, ближайшей к стойке. В зависимости от количества

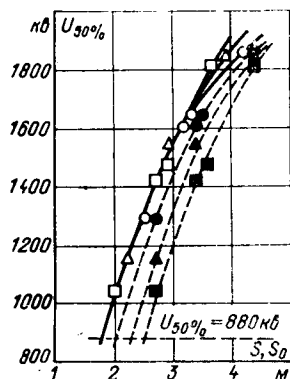


Рис. 4. Зависимости 50%-ных разрядных напряжений промежутка «провод ВЛ 330 кВ — опора» от величины промежутка S (○, △, □) и от расстояния S_0 (●, ▲, ■) для $n=2$ и $r_p=0,2 \text{ м}$ (○, ●), $n=3$ и $r_p=0,6 \text{ м}$ (△, ▲), $n=4$ и $r_p=1,0 \text{ м}$ (□, ■).

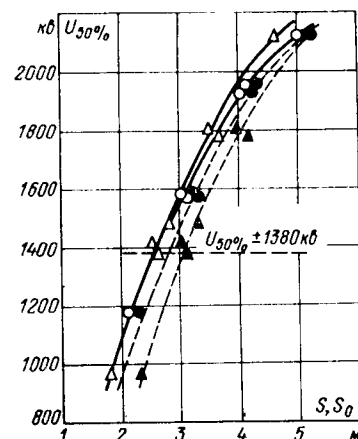


Рис. 5. Зависимости 50%-ных разрядных напряжений промежутка «провод ВЛ 500 кВ — опора» от величины промежутка S (○, △) и от расстояния S_0 (●, ▲) для $n=3$ и $r_p=0,25 \text{ м}$ (○, ●), $n=4$ и $r_p=0,75 \text{ м}$ (△, ▲).

составляющих k принимает следующие значения: $k=1$ при $n=2 \div 4$; $k=2$ при $n=5 \div 8$.

При испытаниях по мере возможности проводилась прямая проверка влияния конструкции провода. Это достигалось за счет исследований промежутков между проводом и опорой при неизменном положении гирлянды с проводом (неизменном расстоянии от оси расщепленного провода до стойки) в один день при неизменных или очень близких атмосферных условиях.

Данные, приведенные в табл. 3 и на рис. 4—6, дают наглядное представление о влиянии конструкции провода на электрическую прочность промежутка S между проводом и опорой. Особенно заметно это влияние для больших промежутков S . Так, для ВЛ 330 кВ (рис. 4) при $S \leq 3 \text{ м}$ электрическая прочность воздушного промежутка «провод — опора» практически не зависит от радиуса расщепления провода. При $S > 3 \text{ м}$ наблюдается расхождение зависимостей $U_{50\%} = f(S)$ для различных проводов, причем чем больше радиус расщепления провода, тем выше прочность промежутка.

Аналогично для ВЛ 500 и 750 кВ наблюдается сближение зависимостей $U_{50\%} = f(S)$ при малых

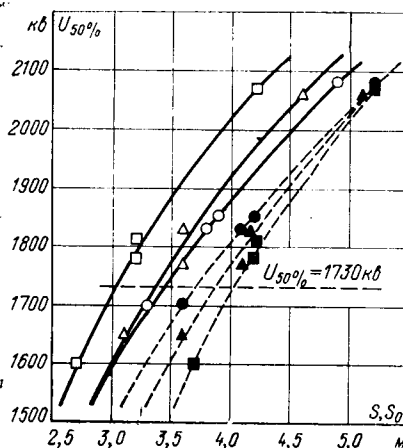


Рис. 6. Зависимости 50%-ных разрядных напряжений промежутка «провод ВЛ 750 кВ — опора» от величины промежутка S (○, △, □) и от расстояния S_0 (●, ▲, ■) для $n=4$ и $r_p=0,4 \text{ м}$ (○, ●), $n=5$ и $r_p=0,6 \text{ м}$ (△, ▲), $n=6$ и $r_p=1,0 \text{ м}$ (□, ■).

Таблица 3

Конструкция провода $n; r_p, м$	Длина промежутка «провод—стойка» $S, м$	Расстояние между осью провода и стойкой $S_0, м$	50%-ное разрядное напряжение $U_{50\%}, кВ$	Стандарт $\sigma, \%$
2 0,2	2,5	2,7	1290	6,2
	3,2	3,4	1610	5,0
	3,3	3,5	1650	6,0
	4,2	4,4	1860	5,9
3 0,6	2,2	2,7	1160	4,3
	2,9	3,4	1550	7,7
	3,9	4,4	1850	5,2
4 1,0	2,0	2,7	1040	5,8
	2,7	3,4	1420	7,0
	2,9	3,6	1480	3,8
	3,4	4,4	1620	4,7
3 0,25	2,1	2,3	1180	4,2
	3,0	3,2	1580	5,7
	3,1	3,3	1570	6,4
	4,0	4,2	1920	—
	4,1	4,3	1950	6,1
	5,0	5,2	2120	5,7
4 0,75	1,8	2,3	970	3,1
	2,5	3,0	1410	7,1
	2,6	3,1	1380	7,3
	2,8	3,3	1480	6,1
	3,5	4,0	1800	6,1
	3,6	4,1	1790	6,7
4 0,40	4,6	5,1	2120	3,3
	3,3	3,6	1700	4,6
	3,8	4,1	1830	6,0
	3,9	4,2	1850	4,6
5 0,60	4,9	5,2	2080	3,8
	3,1	3,6	1650	9,1
	3,6	4,1	1770	4,5
	3,6	4,1	1830	4,1
6 1,00	4,6	5,1	2060	2,0
	2,7	3,7	1600	6,9
	3,2	4,2	1780	5,6
	3,2	4,2	1810	3,3
8 0,60	4,2	5,2	2070	7,2
	6,6	7,2	2430	5,1
12 1,50	6,6	7,2	2450	5,9
	5,7	7,2	2400	5,0
	5,7	7,2	2420	6,2

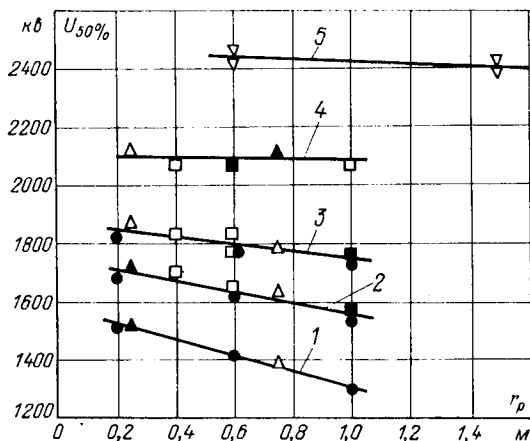


Рис. 7. Зависимости 50%-ных разрядных напряжений промежутка «провод—опора» от радиуса расщепления провода при $S_0=3,1 м$ (1), $3,6 м$ (2), $4,1 м$ (3), $5,2 м$ (4), $7,2 м$ (5); для ВЛ 330 кВ (O, ●), ВЛ 500 кВ (△, ▲) и ВЛ 750 кВ (□, ■), построенные по экспериментальным точкам табл. 3 (O, △, □, ▽) и по кривым рис. 4—6 (●, ▲, ■).

значениях S и расхождение их при увеличении S , характеризующее упрочнение промежутка с увеличением радиуса расщепления (рис. 5 и 6).

Отмеченная закономерность приводит к уменьшению влияния радиуса расщепления на электрическую прочность изоляционной системы «провод—опора» при неизменном расстоянии от оси провода до опоры S (рис. 4—6). Действительно, зависимости $U_{50\%}=f(S_0)$ при разных радиусах расщепления заметно различаются при малых величинах $S_0 < 4 м$. При $S_0=4 м$ это различие становится значительно меньше, а при $S_0=5 м$ все зависимости $U_{50\%}=f(S_0)$ практически сливаются, что указывает на полную независимость электрической прочности системы «провод—опора» от радиуса расщепления провода при неизменном расстоянии от оси провода до опоры, т. е. при сохранении точки подвеса гирлянды к опоре.

Так, по данным табл. 3 при неизменном расстоянии $S_0=7,2 м$ электрическая прочность системы «провод—опора» оказалась одинаковой при существенно различном радиусе расщепления проводов $r_p=0,6 м$ ($S=6,6 м$) и $r_p=1,5 м$ ($S=5,7 м$), т. е. изменение длины изоляционного промежутка S на $0,9 м$ не повлияло на электрическую прочность всей системы. По данным рис. 4—6 на рис. 7 приведены зависимости 50%-ных раз-

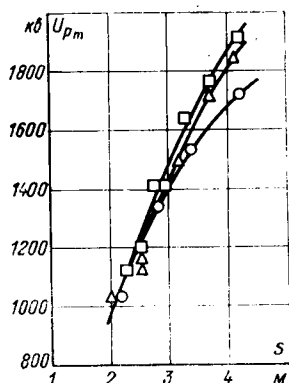


Рис. 8. Зависимости разрядных напряжений промежутка «провод—опора» от длины промежутка при напряжении промышленной частоты для $n=2$ и $r_p=0,2 м$ (O), $n=8$ и $r_p=0,6 м$ (△), $n=12$ и $r_p=1,5 м$ (□).

ных расстояниях между осью провода и стойкой опоры S_0 . Для построения зависимостей на рис. 7 использованы экспериментальные точки при $S_0=3,1; 3,6; 4,1; 5,2$ и $7,2 м$, а также точки, полученные из кривых рис. 4—6 для тех расстояний S_0 , для которых экспериментальных точек нет.

Из рис. 7 следует, что при увеличении расстояния между осью расщепленного провода и стойкой опоры S_0 зависимости разрядных напряжений от радиуса расщепления провода ослабевают. При $S_0 \geq 5 м$ изменение радиуса расщепления в широких пределах практически не сказывается на величинах разрядных напряжений, но даже и при $S_0 \leq 5 м$ зависимости $U_{50\%}=f(r_p)$ значительно слабее, чем

следовало бы ожидать исходя из изменения изоляционных расстояний. Такие закономерности определяются эффектом выравнивания электрического поля в разрядном промежутке при одновременном увеличении радиуса расщепления и числа состав-ляющих провода в фазе.

Полученные данные позволяют дополнить выводы [Л. 1] о влиянии размеров и конструкции опоры на разрядные напряжения воздушных промежутков между проводом и опорой выводами о влиянии на разрядные напряжения этих же промежутков конструкции второго электрода — расщепленного провода. Как следует из данных настоящих исследований, электрическая прочность воздушных промежутков на опоре зависит не только от размеров металлоконструкций опоры [Л. 1], но и от радиуса расщепления провода. Таким образом, не имеет однозначного ответа вопрос об электрической прочности промежутка «провод — опора» в отрыве от конструкции провода и размеров элементов опоры точно так же, как нельзя рассматривать, например, вопрос об электрической прочности промежутка «высоковольтный электрод — земля» без рассмотрения конструкции электрода (стержень, кольцо, провод и т. д.). В то же время сделанный в [Л. 1] вывод о независимости габаритов опор от их конфигурации (количества воздушных промежутков на опоре), можно дополнить выводом о слабой зависимости габаритов опор от конструкции провода, особенно для линий высших классов напряжения.

Для оценки влияния конструкции провода на размеры изоляционных промежутков на опорах ВЛ разных классов напряжения по данным рис. 4—6 необходимо определить 50%-ные разрядные напряжения по формуле [Л. 5]:

$$U_{50\%} = \frac{U_{\text{фм}} K_{\text{п.р}}}{1 - Z\sigma} \frac{p_0}{p}, \quad (6)$$

где $U_{\text{фм}}$ — амплитуда наибольшего рабочего фазового напряжения; $K_{\text{п.р}}$ — расчетная кратность перенапряжений; Z — статистический коэффициент запаса; p_0/p — отношение атмосферного давления на уровне моря к давлению на высоте расположения линии.

Обработка приведенных в табл. 3 данных не выявила зависимости стандарта σ от длины промежутка «провод — стойка» и конструкции провода, что послужило основанием для усреднения σ по

Таблица 4

Класс напряжения $U_n, \text{кВ}$	50%-ное разрядное напряжение $U_{50\%}, \text{кВ}$	Конструкция провода		Расстояния на опоре	
		n	$r_p, \text{м}$	$S, \text{м}$	$S_0, \text{м}$
330	880	2	0,2	1,7	1,9
		3	0,6	1,7	2,2
		4	1,0	1,7	2,4
500	1380	3	0,25	2,7	2,9
		4	0,75	2,5	3,1
750	1730	4	0,4	3,5	3,8
		5	0,6	3,3	3,9
		6	1,0	3,0	4,0

Таблица 5

Конструкция провода $n; r_p, \text{м}$	Длина промежутка		Амплитуда среднего разрядного напряжения $U_p, \text{кВ}$	Среднеквадратичное отклонение $\sigma_p, \%$
	$S, \text{м}$	$S_0, \text{м}$		
2 0,2	2,1	2,3	1040	3,3
	2,8	3,0	1340	2,7
	3,4	3,6	1550	3,1
	4,2	4,4	1720	2,0
8 0,6	2,1	2,7	1040	2,0
	2,1	2,7	1070	—
	2,5	3,1	1130	—
	2,5	3,1	1160	3,6
	3,2	3,8	1500	3,0
	3,7	4,3	1720	2,2
	4,1	4,7	1850	2,7
12 1,5	2,3	3,8	1120	3,8
	2,5	4,0	1200	—
	2,8	4,3	1410	4,1
	2,9	4,4	1410	—
	3,3	4,9	1640	0,5
	3,7	5,2	1770	2,8
	4,2	5,7	1920	2,8

всем сериям опытов. Усредненное значение σ , использованное при вычислении $U_{50\%}$ по (6), составило $\sigma = 0,06U_{50\%}$.

Соответствующие величины $U_{50\%}$ для ВЛ 330, 500 и 750 кВ приведены на рис. 4—6 (горизонтальные штриховые линии) и использованы для определения изоляционных расстояний на опорах (табл. 4).

Практическое совпадение необходимых расстояний S_0 между осью расщепленного провода и опорой для разных проводов ВЛ 750 кВ означает, что изменение конструкции провода не требует сколько-нибудь существенного увеличения габаритов промежуточных опор. Этот вывод имеет важное практическое значение, так как определяет возможность при неизменных габаритах опор создавать линии с разными радиусами расщепления и соответственно разной пропускной способностью. Переход от четырехкратного расщепления провода к проводу с 5 и 6 составляющими при соответствующем увеличении радиуса расщепления требует некоторого увеличения расстояния от опоры до оси провода. Однако увеличение S_0 значительно меньше, чем увеличение расстояния a , т. е. применение глубокого расщепления позволяет уменьшить изоляционный промежуток «провод — опора», причем это уменьшение тем больше, чем больше радиус расщепления. Аналогично для ВЛ 500 кВ увеличение радиуса расщепления приводит к необходимости незначительного увеличения габаритов опор, однако и в этом случае изоляционные промежутки несколько уменьшаются.

Для ВЛ 330 кВ изоляционный промежуток S не зависит от конструкции провода фазы и составляет $S = 1,7 \text{ м}$. Следовательно, изменение конструкции провода требует соответствующего изменения расстояния S_0 , т. е. изменения габаритов опор.

При свободной подвеске проводов горизонтальный воздушный промежуток между проводом и опо-

рой, возможно, будет определяться условием надежной работы при рабочем напряжении при максимальном отклонении провода. Поэтому наряду с исследованием прочности промежутков при коммутационных перенапряжениях были исследованы разрядные напряжения того же промежутка при напряжении промышленной частоты. При испытаниях определялись средние разрядные напряжения U_p и среднеквадратичное отклонение σ_p .

Результаты исследований электрической прочности промежутка между проводом и опорой с существенно различной конструкцией провода при напряжении промышленной частоты приведены в табл. 5 и на рис. 8 в виде зависимостей амплитуды среднего разрядного напряжения U_p от длины воздушного промежутка S .

Как следует из рис. 8, при расстоянии между проводом и стойкой $S < 2$ м разрядные напряжения не зависят от конструкции провода. При увеличении S зависимости $U_{pm} = f(S)$ для разных проводов расходятся, т. е. с увеличением промежутка все более усиливается влияние конструкции провода на электрическую прочность.

Амплитуда среднего разрядного напряжения промежутка, при которой обеспечивается надежная работа при рабочем напряжении и отклонении провода при максимальной скорости ветра, определяется из выражения [Л. 5]:

$$U_{pm} = \frac{U_{\Phi m} \sqrt{2}}{1 - Z\sigma} \frac{p_0}{p}. \quad (7)$$

Обработка приведенных в табл. 5 данных показала независимость среднеквадратичного отклонения σ_p от конструкции провода и длины промежутка,

что позволило усреднить σ_p по всем сериям опытов. Усредненное значение σ_p составило $\sigma_p = 2,7\%$. С учетом случайных колебаний метеоусловий

$$\sigma_{pz} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_m^2}.$$

Величина σ_m для воздушных промежутков составляет около 2—3% [Л. 5]. Соответственно при $\sigma_m = 2\%$ имеем $\sigma_{pz} = 3,3\%$. Как следует из рис. 8, при $U_{pm} < 1200$ кВ воздушный промежуток, выбранный по условию надежной работы при рабочем напряжении, не зависит от конструкции провода. Очевидно, что для линий с более высокими номинальными напряжениями следует учитывать влияние радиуса расщепления на величину воздушного промежутка «провод — опора», необходимого по условию надежной работы при рабочем напряжении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г. Н., Лысков Ю. И., Редков В. П. Электрическая прочность воздушных промежутков между проводом и опорой при коммутационных перенапряжениях. — «Электричество», 1972, № 5, с. 25—31.
2. Александров Г. Н. и др. О целесообразности создания ВЛ переменного тока с увеличенным радиусом расщепления. — «Электрические станции», 1973, № 8, с. 48—53.
3. Kachler A. J., Laforest J. J., Zaffanella L. E. Switching surge flashover of VHV Transmission line insulation IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 90, 1971.
4. Balderston G. J., Schamberger J. M., Juette G. W., Zaffanella L. E. VHV AC transmission line design based on project VHV test results. CIGRE, R. 31—32, 1972.
5. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кизеветтер В. Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Л., «Энергия», 1969, 238 с.
6. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Редков В. П. Электрическая прочность воздушного промежутка между проводом линии сверхвысокого напряжения и землей при внутренних перенапряжениях. — «Электричество», 1965, № 4, с. 20—24.

[27.7.1973]



Электрический разряд в многоэлектродных системах

Канд. техн. наук БАЗЕЛЯН Э. М., доктор техн. наук ЛЕВИТОВ В. И.,

канд. техн. наук ПУЛАВСКАЯ И. Г.

ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского

Высоковольтная техника во многих случаях имеет дело с системой электродов, в которой возможно одновременное развитие разряда из нескольких точек. Примером таких систем в инженерных сооружениях могут служить линии передачи или шины и аппараты подстанций, а в природных условиях — грозовое облако и поверхность земли с расположенными на ней объектами. Одновременное формирование нескольких очагов разряда в определенных условиях может оказать заметное влияние как на статистику пробивных напряжений изоляционной конструкции, так и на распределение траекторий искрового канала в межэлектродном пространстве, т. е. на те параметры, с которыми связана оценка надежности работы технического устройства при воздействии высокого напряжения.

В лабораторных испытаниях не всегда удается полностью воспроизвести высоковольтную конструк-

цию — приходится ограничиваться моделью части электродов, а иногда и просто судить о поведении исследуемой изоляции по характеристикам простейших лабораторных промежутков, где от каждого из электродов может развиваться только один канал разряда (например, промежутка стержень — стержень). В подобной ситуации нужны обоснованные доказательства тождественности модели и реальной конструкции либо методика пересчета лабораторных данных, которая не может быть создана без четких представлений об особенностях пробоя изоляционного промежутка при одновременном развитии нескольких каналов разряда от его электродов.

Для удобства анализа промежутков с несколькими очагами разряда можно приближенно рассматривать как совокупность элементарных промежутков с сосредоточенными электродами, от каждого из которых эффективно развивается не более одно-

го очага разряда. Система, составленная из двух и более элементарных промежутков в дальнейшем названа многоэлектродной системой.

Особенности электрического разряда в многоэлектродных системах связаны с одновременным развитием ионизационных процессов в нескольких элементарных промежутках, причем пробой любого из них означает пробой системы. Следует ожидать взаимного влияния разрядов в элементарных промежутках. Степень этого влияния будет зависеть от расположения электродов и их формы.

Методологически целесообразно выделить идеализированную многоэлектродную систему, у которой отсутствует взаимное влияние разрядных процессов в элементарных промежутках. Такая система названа несвязанной многоэлектродной системой в отличие от связанных многоэлектродных систем, где взаимное влияние разрядных процессов должно быть учтено.

Несвязанная система может быть представлена как совокупность полностью экранированных друг от друга элементарных промежутков, параллельно подключенных к источнику, выходное напряжение которого не зависит от разрядных токов, но резко снижается при пробое любого промежутка. Статистика пробоя несвязанной системы целиком и однозначно задается статистическими характеристиками ее элементарных промежутков.

Достаточно, например, знать распределение пробивных напряжений элементарных промежутков, для того чтобы определить вероятности их пробоя в несвязанной системе [Л. 1—2] и вычислить распределение пробивных напряжений такой системы в целом [Л. 3—5].

Если система образована из n элементарных промежутков, каждый из которых, испытанный уединенно (вне системы), характеризуется кривой распределения пробивных напряжений:

$$\Phi_k(U) = \int_0^U \varphi_k(U) dU, \quad (1)$$

где $\varphi_k(U)$ — плотность вероятности значений пробивного напряжения, то распределение пробивных напряжений системы равно:

$$\Phi_{н.с}(U) = \int_0^U \sum_{k=1}^n \left[\varphi_k(U) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n (1 - \Phi_m(U)) \right] dU. \quad (2)$$

В частном случае, для одинаковых промежутков [$\Phi_k(U) = \Phi(U)$] получается хорошо известное выражение:

$$\Phi_{н.с}(U) = 1 - [1 - \Phi(U)]^n. \quad (3)$$

Поскольку $0 \leq \Phi(U) \leq 1$, из выражения (3) следует, что $\Phi_{н.с} > \Phi$ для любых равных величин U , кроме границ, где вероятность пробоя равна нулю или единице. Вывод относится к 50%-ному разрядному напряжению системы, которое увеличением числа элементарных промежутков может быть снижено до любого значения, удовлетворяющего неравенству:

$$0 < \Phi(U) < 0,5.$$

Требуемое для этого число промежутков равно:

$$n \geq - \frac{\ln 2}{\ln [1 - \Phi(U)]}. \quad (4)$$

Плотность вероятности пробивных напряжений одного из элементарных промежутков по испытаниям в многоэлектродной системе задается выражением:

$$\varphi_{к.с}(U) = \varphi_k(U) \frac{\prod_{m=1}^n [1 - \Phi_m(U)]}{\int_0^\infty \left\{ \varphi_k(U) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n [1 - \Phi_m(U)] \right\} dU} \quad (5)$$

и, естественно, отличается от плотности вероятности $\varphi_k(U)$, характеризующей данный промежуток как уединенный.

Точно так же плотность вероятности пробивных напряжений несвязанной системы в целом

$$\varphi_{н.с}(U) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(U) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n [1 - \Phi_m(U)] \quad (6)$$

будет отличаться от $\varphi_k(U)$ для любого уединенного элементарного промежутка, входящего в ее состав. В частности, система из конечного числа одинаковых элементарных промежутков, у которых $\varphi_k(U)$ задается нормальным законом, не может иметь нормального распределения для своих пробивных напряжений $\varphi_{н.с}(U)$.

Вероятность пробоя элементарного промежутка в несвязанной системе может быть представлена как

$$\Psi_k = \int_0^\infty \varphi_k(U) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n [1 - \Phi_m(U)] dU. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что для воздействия на вероятность пробоя любого из промежутков несвязанной системы требуется изменение разрядного напряжения хотя бы одного из них. Оценки требуемых изменений легко выполнить для нормальных распределений $\varphi_k(U)$, при которых в случае двух элементарных промежутков интеграл (7) приводится к табулированному интегралу вероятности:

$$\Psi_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \int_0^A e^{-t^2/2} dt \right), \quad (8)$$

где

$$A = (\bar{U}_1 - \bar{U}_2) (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{-1/2}. \quad (9)$$

Здесь $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \sigma_1, \sigma_2$ — соответственно средние пробивные напряжения элементарных промежутков и их среднеквадратичные отклонения.

Результаты расчетов, приведенные ниже, указывают в долях σ изменение среднего пробивного напряжения промежутка ($\Delta \bar{U}/\sigma$), необходимое для снижения вероятности его пробоя от 0,5 до требуемого уровня Ψ_1 (в расчете принято $\sigma_1 = \sigma_2$):

Ψ_1	0,5	10^{-1}	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	10^{-3}
$\Delta \bar{U}/\sigma$	0	1,82	2,32	3,32	4,38

По данным [Л. 6] для промежутков большой длины характерен значительный разброс пробивных напряжений со стандартом отклонения $\sigma = 5-8\%$.

Это значит, что в несвязанной системе для снижения вероятности пробоя одного из многометровых элементарных промежутков до уровня $\Psi_1 = 10^{-2}$ — 10^{-3} потребуются его принудительное упрочнение на 15—35%. Трудно предполагать, чтобы воздействие такого рода нашли широкое применение в практике для регулирования вероятности пробоя очень длинных промежутков или вероятности поражения молнией заземленных электродов.

Связанная многоэлектродная система не определяется однозначно характеристиками элементарных промежутков, входящих в ее состав. Необходимо дополнительно учесть влияние разрядных процессов друг на друга, которое зависит как от параметров элементарных промежутков, так и от их взаимного расположения в системе.

Возникновение электрического разряда с одного из электродов системы приведет к ослаблению электрического поля в его окрестностях, в результате чего будет заторможено развитие разрядов, начавшихся позже. Тем самым предопределяется элементарный промежуток, пробой которого будет происходить с наибольшей вероятностью. В дальнейшем такой элементарный промежуток условно назван активным элементарным промежутком, а все остальные промежутки системы — пассивными элементарными промежутками.

Представляет интерес сопоставление двух многоэлектродных систем, предельных по степени взаимосвязи. Если степень взаимного влияния в системе неограниченно велика, развитие разрядных процессов в пассивных элементарных промежутках будет полностью заторможено, а вероятность пробоя активного промежутка приблизится к единице. Естественно, что в таком случае распределение пробивных напряжений связанной системы в целом $\Phi_{с.с}(U)$ будет приближаться к распределению $\Phi_a(U)$ для ее активного элементарного промежутка в уединенном состоянии.

При очень слабом взаимном влиянии система вырождается в несвязанную с распределением $\Phi_{н.с}(U)$, подчиняющимся выражению (2). Поскольку активный промежуток также входит в ее состав и для него справедливо условие

$$\Phi_{н.с}(U) > \Phi_a(U),$$

то можно заключить, что кривые $\Phi_{н.с}(U)$ и $\Phi_a(U)$ являются граничными для области существования распределений пробивных напряжений связанной системы:

$$\Phi_a(U) \leq \Phi_{с.с}(U) \leq \Phi_{н.с}(U). \quad (10)$$

Сопоставление распределения пробивных напряжений связанной системы с граничными распределениями дает количественную характеристику степени взаимосвязи разрядных процессов в элементарных промежутках. Например, линеаризуя зависимость между распределениями, можно записать:

$$\text{или} \quad \left. \begin{aligned} \Phi_{с.с}(U) &= K_{св} \Phi_a(U) + (1 - K_{св}) \Phi_{н.с}(U) \\ \varphi_{с.с}(U) &= K_{св} \varphi_a(U) + (1 - K_{св}) \varphi_{н.с}(U), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где коэффициент $K_{св}$ нужно трактовать как коэффициент взаимосвязи, для которого справедливо:

$$0 \leq K_{св} \leq 1.$$

Полученное выражение формально и никак не отображает физическую природу взаимосвязи, но оказывается полезным при анализе возможностей управления вероятностью пробоев элементарных промежутков в связанной системе.

Пусть для простоты система состоит из двух промежутков — активного и пассивного с распределениями пробивных напряжений $\Phi_a(U)$ и $\Phi_{п}(U)$.

Согласно (6) для несвязанной системы

$$\varphi_{н.с}(U) = \varphi_a(U)[1 - \Phi_{п}(U)] + \varphi_{п}(U)[1 - \Phi_a(U)]. \quad (12)$$

Тогда с учетом (12) интегрирование выражения (11) дает:

$$\left\{ K_{св} + (1 - K_{св}) \int_0^\infty \varphi_a(U) [1 - \Phi_{п}(U)] dU \right\} + \left\{ (1 - K_{св}) \int_0^\infty \varphi_{п}(U) [1 - \Phi_a(U)] dU \right\} = 1. \quad (13)$$

Две части выражения (13), заключенные в фигурные скобки, определяют соответственно вероятности пробоя активного и пассивного промежутков:

$$\Psi_a = K_{св} + (1 - K_{св}) \int_0^\infty \varphi_a(U) [1 - \Phi_{п}(U)] dU; \quad (14)$$

$$\Psi_{п} = (1 - K_{св}) \int_0^\infty \varphi_{п}(U) [1 - \Phi_a(U)] dU. \quad (15)$$

Сравнение зависимостей (15) и (7) показывает, что вероятность пробоя пассивного элементарного промежутка в связанной системе снижается по сравнению с вероятностью его пробоя в несвязанной системе тем более сильно, чем выше коэффициент взаимосвязи. Таким образом, в связанной многоэлектродной системе появляется принципиальная возможность регулирования вероятности пробоя промежутков не только изменением их электрической прочности, но и вариацией коэффициента связи. Это позволяет надеяться достичь желаемой вероятности при сравнительно малом снижении прочности или даже без него. Высказанные соображения иллюстрируются результатами расчета регулирующих изменений пробивного напряжения при различной величине коэффициента связи.

Ψ_1	10^{-1}			$5 \cdot 10^{-2}$			10^{-2}			10^{-3}
$K_{св}$	0,8	0	0,8	0,9	0	0,95	0,98	0	0,95	0,98
$\Delta U/\sigma$	1,82	0	2,32	0,68	0,3,32	1,19	0	4,38	2,9	0,85

Регулирование вероятности пробоя промежутков несвязанной и связанной систем принципиально различно по энергетическим затратам. В первом случае регулирующее воздействие должно полностью обеспечить все потребности в энергии для управления разрядом, во втором — дать только инициирующий толчок процессу торможения или ускорения разряда, энергия для которого может черпаться от источника напряжения, действующего на систему.

На основе приведенных соображений прогноз возможностей регулирования для связанных систем кажется значительно более перспективным. Важно поэтому экспериментально исследовать характеристики связанных многоэлектродных систем, изучить природу и оценить интенсивность взаимного влия-

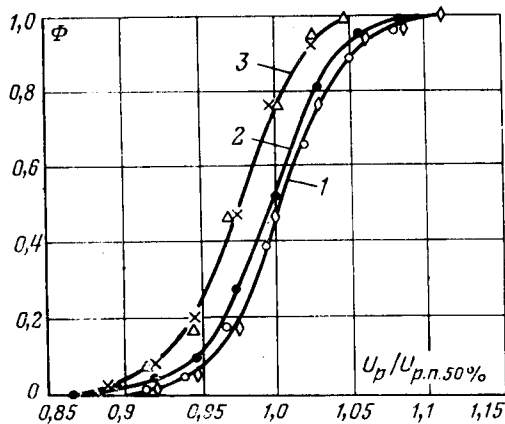


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные распределения пробивных напряжений для промежутков с заземленными электродами, имеющими полусферическую головку.

1 — $r=10$ см (О — уединенный промежуток, о — система); 2 — $r=100$ см (уединенный промежуток); 3 — $r=100$ см, система (X — опыт, Δ — расчет).

ния между разрядными процессами в элементарных промежутках, получить данные о взаимосвязи распределений пробивных напряжений системы с вероятностью пробоя промежутков.

Экспериментальные исследования были выполнены в простейшей многоэлектродной системе стержень — два стержня на плоскости. Подобная система типична для молниезащиты, где определение вероятности поражения заземленных электродов играет решающую роль. Здесь, говоря о взаимном влиянии разрядных процессов в элементарных промежутках, следует иметь в виду встречный разряд, развивающийся от вершины заземленных стержней. Общие соображения о взаимном влиянии, равно как и гипотеза о роли встречного разряда в выборе точки поражения, уже высказывались в специальной литературе [Л. 7 и 8].

В статье сделана попытка непосредственных измерений экранирующего действия и оценено его влияние на вероятность поражения заземленных электродов.

Эксперименты выполнены при отрицательном напряжении, для которого характерен хорошо развитый положительный встречный лидер. Длительность фронта импульса напряжения равна 30 мкс и приблизительно соответствует минимуму вольтсекундных характеристик исследуемых промежутков.

Пробивное напряжение измерялось специально разработанным амплитудным вольтметром, обеспечивающим большую точность, чем электронный осциллограф. Это было особенно важно для построения распределений пробивных напряжений. Распределения вычислялись по 200—300 измерениям. Число ударов в заземленные электроды фиксировалось автоматическим счетчиком.

Заземленные стержни имели сменные головки: полусферическую диаметром 50 мм и острозаточенную коническую с углом при вершине 30° , благодаря чему можно было получать как одинаковые, так и различные условия для возникновения и развития встречных разрядов.

Для изменения степени взаимосвязи в системе заземленные электроды могли смещаться в диаме-

трально противоположных направлениях от вертикальной оси систем. При этом во всех опытах сохранялись неизменными: высота подвеса высоковольтного электрода и длина элементарных разрядных промежутков, равная 200 см. Соответственно высота h заземленных электродов увеличивалась с увеличением радиуса смещения r .

Минимальная величина h была выбрана равной 110 см и исключала разряды в плоскость.

Радиус смещения электродов варьировался в пределах 10—100 см. При $r=100$ см исследуемая система практически может считаться несвязанной. На это указывает распределение ее пробивных напряжений $\Phi_c(U)$, которое построено на рис. 1 по экспериментальным данным для электродов с полусферическими головками. Здесь и в дальнейшем напряжение отнесено к 50%-ному разрядному напряжению элементарного промежутка с электродом с полусферической головкой при $r=100$ см ($U_{p,50\%}$). Распределение точно совпадает с рассчитанным по (3), справедливой для идеализированной несвязанной системы. Подобный результат получался и для электродов с различными головками.

При $r=10$ см экспериментальное распределение системы практически не отличается от распределения $\Phi(U)$ для уединенного элементарного промежутка (рис. 1). Такая система характеризуется сильной степенью взаимосвязи, и для нее необходимо учитывать экранирующее действие встречных разрядов.

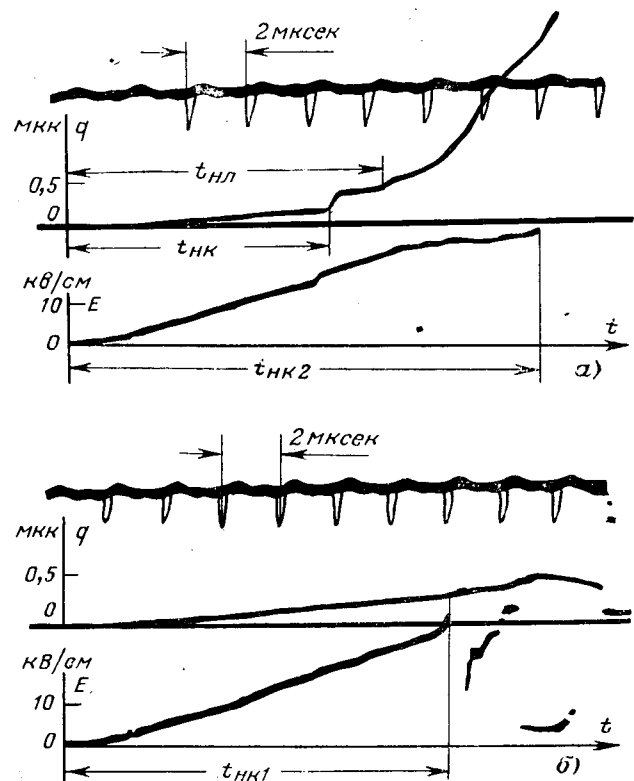


Рис. 2. Осциллограммы объема заряда с конуса (средний луч) и напряженности на поверхности полусферы (нижний луч).

а — конус открыт; б — конус закрыт чехлом; t_{HK} — время возникновения короны, t_{HL} — время возникновения лидера.

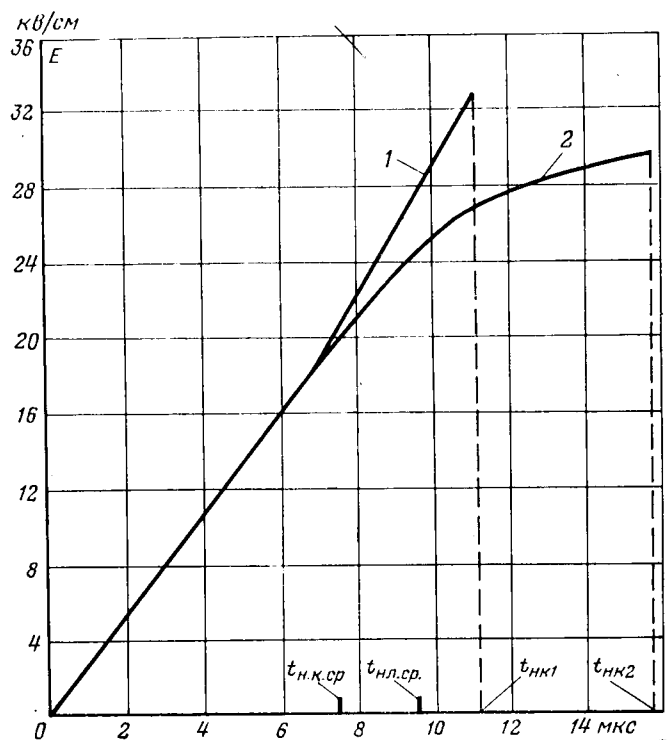


Рис. 3. Напряженность на поверхности полусферы.
1 — конус закрыт чехлом; 2 — конус открыт.

Для количественной оценки экранирующего действия встречного разряда методом секционированных электродов [Л. 9] измерялась напряженность электрического поля на полусферической головке заземленного электрода в двух случаях: при развитии встречного разряда с соседнего электрода с конической головкой и при искусственном подавлении этого разряда с помощью накладываемого на головку диэлектрического чехла толщиной 8 мм. Развитие разряда контролировалось электронно-оптическим преобразователем с усилением света. Как указано ниже, в подавляющем большинстве случаев разряд начинался раньше от электрода с конической головкой.

На рис. 2 представлены типичные осциллограммы напряженности электрического поля у поверхности заземленного электрода с полусферической головкой и синхронные с ними осциллограммы заряда, внедренного в промежуток с соседнего электрода с конической головкой. По осциллограммам заряда производилось измерение времени возникновения и развития отдельных фаз встречного разряда и контролировалось отсутствие газоразрядных процессов на конической головке, когда она была закрыта диэлектрическим чехлом. Смещение заземленных электродов от центра промежутка во время опыта было равно $r=10$ см.

Большой разброс величины напряженности, обусловленный статистическим разбросом характеристик внизнаправленного разряда от высоковольтного электрода, исключал сравнение отдельных осциллограмм в опытах с открытой конической головкой и закрытой чехлом. Потребовалось построение усредненных зависимостей напряженности от време-

ни $E(t)$, которое выполнено на рис. 3. Там же по оси абсцисс отмечены средние времена возникновения встречной короны t_k и встречного лидера t_l с конической головки. До начала встречного разряда с открытой конической головки кривые $E(t)$ в опытах с диэлектрическим чехлом и без него полностью совпадают. Это значит, что сам по себе чехол мало изменяет электрическое поле у поверхности полусферы. Рост напряженности в опыте без чехла замедлялся только после возникновения встречной короны и особенно встречного лидера. Так, например, в момент времени $t=11$ мкс снижение напряженности за счет экранирующего действия встречного разряда составило 7 кВ/см.

Таким образом, экранирующее действие встречного лидера проявляется в весьма заметном снижении напряженности электрического поля у соседнего электрода и потому не может не сказаться на возникновении и развитии встречного разряда от его поверхности.

Измерения времени возникновения различных фаз встречных разрядов были проведены при малом радиусе смещения ($r=10$ см), когда экранирование наиболее заметно, и при большом ($r=100$ см), где оно должно практически отсутствовать. Вершины электродов были открыты.

Независимо от радиуса смещения r с вероятностью не менее 0,9 встречная корона и встречный лидер начинались раньше от электрода с конической головкой. Это можно заключить из рис. 4, где

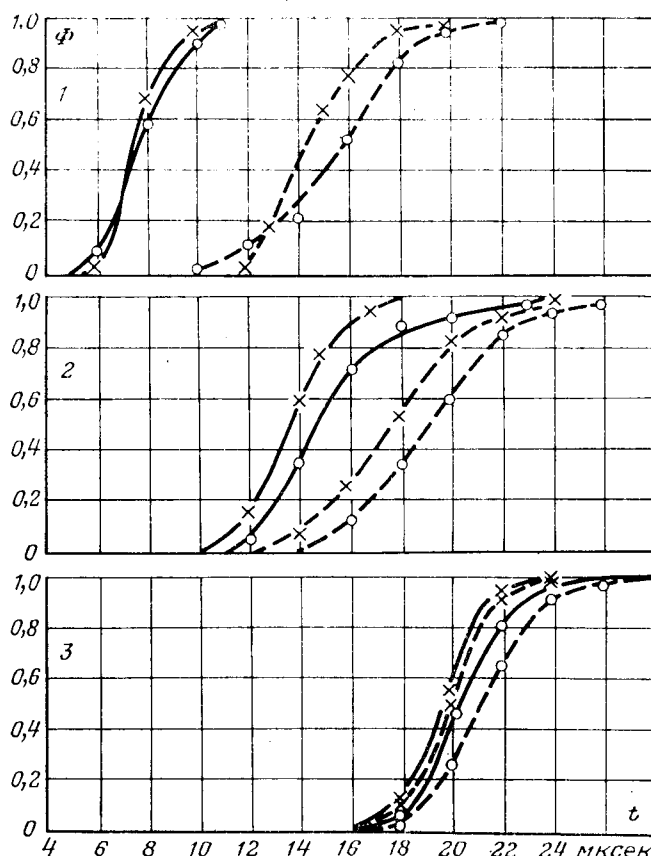


Рис. 4. Распределение времени начала развития короны (1), лидера (2) и сквозной фазы (3).

— — — конус; — — — полусфера; $\circ$ — $r=10$ см; $\times$ — $r=100$ см.

представлены распределения времен начала встречной короны, встречного лидера и сквозной фазы искры, которая возникала после контакта стримерных зон внизнаправленного и встречного лидеров.

При $r=100$ см, несмотря на задержку в появлении, встречный лидер с полусферической головки достигал сквозной фазы практически одновременно с лидером от электрода с конической головкой (рис. 4). Причина этого состоит в усилении электрического поля в межэлектродном пространстве во время задержки за счет подъема напряжения и внедрения в промежуток отрицательного объемного заряда внизнаправленным лидером. В результате более позднее появление встречного лидера с полусферы компенсируется большей скоростью его движения.

При близком расположении заземленных электродов в подавляющем большинстве случаев встречный лидер с полусферической головки развивается в поле, ослабленном за счет экранирующего действия встречного лидера с соседнего электрода с конической головкой, возникшего первым. По этой причине полной компенсации здесь не наблюдается — в среднем переход к сквозной фазе для лидера с полусферической головки запаздывает приблизительно на 1 мксек.

Поскольку пробой завершается в этом из промежутков, где раньше устанавливается сквозная фаза, электрод с конической головкой поражается с большей вероятностью. Эффект проявляется тем сильнее, чем ближе заземленные электроды и боль-

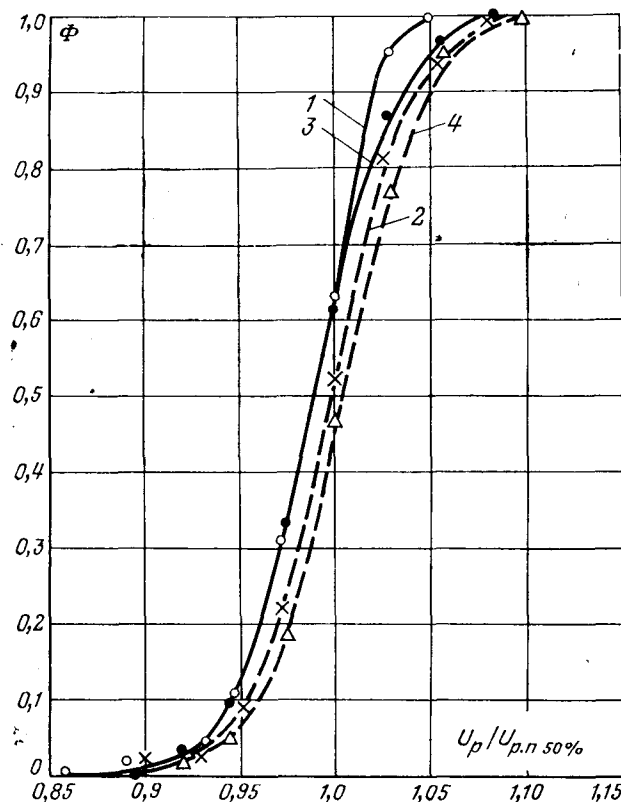


Рис. 6. Пробивные напряжения уединенных промежутков. 1 и 3 — головка заземленного электрода коническая, $r=100$ см и 10 см соответственно; 2 и 4 — головка заземленного электрода полусферическая, $r=100$ и 10 см соответственно.

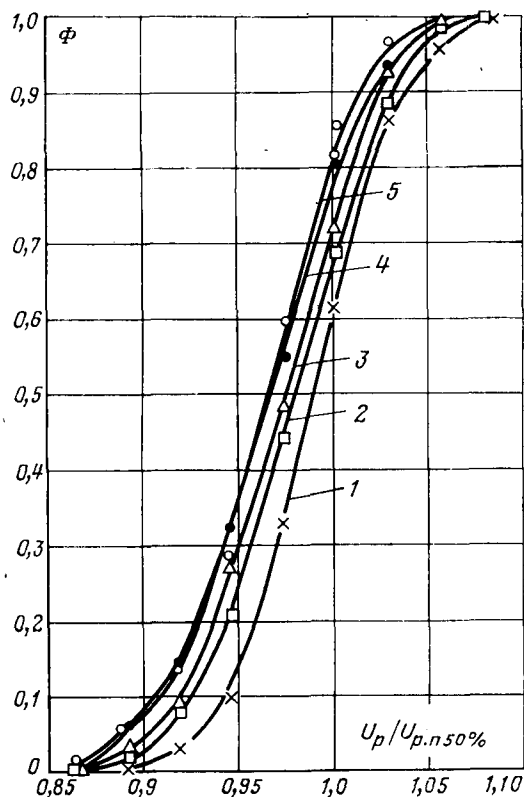


Рис. 5. Распределение пробивных напряжений.

1 — уединенный промежуток, головка заземленного стержня коническая, $r=10$ см; 2—5 — система, головки заземленных электродов конус и полусфера; $r=10$ см (2); 40 см (3); 60 см (4); 100 см (5).

ше степень взаимного влияния. Это можно видеть из приведенных ниже экспериментальных значений вероятности поражения электрода с конической головкой при различных радиусах смещения и значений коэффициента $K_{в.с.}$, которые вычислены по (11) для $U=U_{p.п. 50\%}$ на основе экспериментальных распределений пробивных напряжений связанной системы (рис. 5):

Радиус смещения r , см	10	40	60	100
Экспериментальная вероятность поражения электрода с конической головкой	0,81	0,77	0,66	0,58
Коэффициент взаимосвязи $K_{в.с.}$	0,64	0,48	0,18	0
Вероятность поражения по формуле (7)	0,6	—	—	0,57

Из рис. 5 видно, что как и предполагалось, с увеличением степени взаимосвязи кривые $\Phi_c(U)$ смещаются вправо, приближаясь к распределению $\Phi_a(U)$ для уединенного элементарного промежутка с электродом с конической головкой, который в данном случае выполняет роль активного промежутка.

Можно также показать, что распределения пробивных напряжений элементарных промежутков действительно не определяют однозначно вероятность их пробоя в связанной системе. Эти распределения для электродов с полусферической и конической головкой построены на рис. 6. Они мало зависят как от формы головки заземленных электродов, так и от радиуса смещения. Например, на уровне $\Phi=0,5$ наблюдавшиеся изменения напряжения не превышают 1—1,5%. Естественно, что подстановка

распределений в выражение (7) и последующее численное интегрирование привели к практически одинаковым вероятностям поражения при любых радиусах смещения. Результаты расчета вероятностей поражения совпадают с экспериментом только при большом радиусе смещения ($r=100$ см), когда систему можно считать несвязанной. Максимальное расхождение данных, наблюдавшееся для $r=10$ см, составило 35%. Это намного превышает суммарную погрешность расчета и эксперимента.

Таким образом, экспериментальные величины вероятности поражения, полученные в многоэлектродных системах с большой степенью взаимосвязи, не укладываются в соотношения для несвязанных систем, которые учитывают только распределения пробивных напряжений элементарных промежутков. Здесь в соответствии с выражениями (14) и (15) необходимо ввести поправку на коэффициент взаимосвязи.

Тот факт, что взаимное влияние разрядных процессов в элементарных промежутках связанной системы может существенно изменять вероятности их пробоя и распределение пробивных напряжений, представляет определенный интерес в связи с изысканием методов управления траекторией высоковольтного разряда. В первую очередь здесь следует иметь в виду молниезащиту, где задача о регулировании вероятности поражения заземленных объектов сводится тем самым к отысканию средств иницирования или торможения встречного лидера. На основе анализа многоэлектродных систем можно высказать следующие соображения о возможностях регулирования.

1. Эффективность слабых регулирующих воздействий должна возрастать с уменьшением расстояния между молниеотводом и защищаемым объектом, поэтому их применение, видимо, окажется перспек-

тивным для повышения надежности защиты при малых превышениях молниеотвода над близко расположенным объектом, но не для расширения границы зоны защиты.

2. Регулирование вероятности поражения наиболее целесообразно для высоких объектов, где вследствие большой длины встречных лидеров можно ожидать значительной взаимосвязи между разрядами в элементарных промежутках.

3. При прочих равных условиях эффективность регулирования для отрицательной молнии должна быть выше, чем для положительной, при которой с поверхности заземленных объектов развивается отрицательный встречный лидер, требующий более сильных электрических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базелян Э. М. Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов. «Электричество», 1967, № 7, с. 65—69.
2. Берлина Н. С., Горин Б. Н. Защитное действие тросовых молниеотводов с учетом характеристик разброса. — «Электричество», 1972, с. 36—42.
3. Артемьев Д. Е., Тиходеев Н. Н., Шур С. С. Статистические основы выбора изоляции линий электропередачи. М.—Л., «Энергия», 1966, 376 с.
4. Dokopoulos P. Die Durchschlagswahrscheinlichkeit von Hochspannungsisolierungen. — «Electrotech. Zeit.», 1968, A 89, № 7, s. 35—40.
5. Parallel multigaps flashover probability. — IEEE Transaction, PAS-88, 1969, № 12, p. 1814—1821. Aut.: T. Suzuki, I. Kishijima, Y. Ohuch, K. Anjo.
6. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кизеветтер В. Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. М.—Л., «Энергия», 1969, 238 с.
7. Стекольников И. С. Природа длинной искры. Изд. АН СССР, 1960. 272 с.
8. Golde R. N. The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes of Transmission Lines. — AIEE Transaction, v. 64, 1945, p. 902—904.
9. Базелян Э. М. Измерение объемного заряда в начальных стадиях положительной длинной искры. — ЖТФ. 1964, вып. 3, XXXIV, с. 475—476.

[4.10.1973]



УДК 621.315.2:537.212.001.24

О расчете пробивного напряжения в элегазе (SF₆) в системе коаксиальных цилиндров

МОШ В., ХАУШИЛЬД В.

Технический университет, Дрезден, ГДР

Введение. Если выбор оптимальных геометрических размеров и давления газа SF₆ для технической изоляции будет проводиться только по измерениям на лабораторных образцах, то для этой цели придется затратить неоправданно большие средства. Следовательно, необходимо искать пути для предварительного расчета пробивного напряжения такой изоляции. В технических конструкциях с изоляцией газом SF₆ поля обычно являются слабонеоднородными. Для таких полей определение пробивного напряжения обычно проводится как по теоретическим моделям процесса пробоя [Л. 2—5], так и экспериментальным путем [Л. 1 и 6]. Оба метода предполагают знание распределения напряженности поля

или, по крайней мере, максимальной напряженности поля.

Распределение напряженности поля может быть рассчитано с достаточной точностью с помощью цифровых вычислительных машин. Характеристики, отражающие процесс пробоя, должны быть определены экспериментально, например, на типичных промежутках.

В статье на примере коаксиальных цилиндров рассматриваются и сравниваются между собой теоретические и экспериментальные методы определения пробивного напряжения и выводятся простые методы расчета пробивного напряжения при давлении изоляционного газа $p < 6$ атм. (Здесь и в даль-

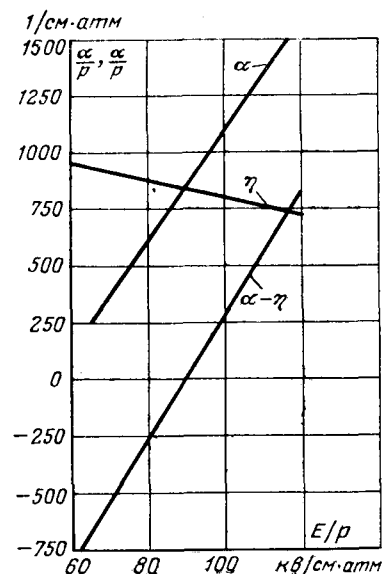


Рис. 1. Зависимость коэффициента ударной ионизации α и коэффициента прилипания η от относительной напряженности E/p .

нейшем имеется в виду давление при температуре 20 °С.)

Расчет пробивного напряжения с помощью модели стримерного механизма. Из математически сформулированных моделей процесса пробоя для расчета пробивного напряжения технических изоляционных систем наиболее подходящей является модель стримерного механизма [Л. 2—5]. Согласно этой модели пробой происходит, когда по прохождении критического пути x_k число электронов в лавине достигает критического: $n_k = 10^8$. По законам развития электронных лавин в электроотрицательных газах условием пробоя является:

$$\int_0^{x_k} (\alpha - \eta) dx = \ln n_k. \quad (1)$$

В (1) коэффициенты ударной ионизации α и прилипания η при определенном давлении являются линейными функциями напряженности поля (рис. 1). Для выражения $(\alpha - \eta)$, определяющего прорастание лавины, справедлива следующая зависимость:

$$(\alpha - \eta)/p = k \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E_{d1}}{p} \right)_i \right]. \quad (2)$$

Множитель $k = 27 \text{ кВ}^{-1}$ характеризует наклон прямой, а величина $\left(\frac{E_{d1}}{p} \right)_i = 89 \frac{\text{кВ}}{\text{см} \cdot \text{атм}}$ — определяет точку пересечения прямой с абсциссой. Эта точка имеет особое значение, так как пробой данного промежутка может произойти только тогда, когда напряженность поля в области промежутка x_k , по крайней мере достигнет значения

$$E_{di} = \left(\frac{E_{d1}}{p} \right)_i p. \quad (3)$$

Таким образом, E_{di} описывает поведение газа при пробое, поэтому далее будем E_{di} называть «внутренней электрической прочностью».

Так как в слабонеоднородном поле напряженность поля зависит от координаты x , то согласно (2) выражение $(\alpha - \eta)$ также становится зависимым от x . В исследуемом поле коаксиальных цилиндров

с целью теоретического анализа развития лавины в радиальном направлении целесообразно ввести полярные координаты. С помощью критического отрезка x_k , расстояния между электродами a и радиуса внутреннего электрода r_i можно рассчитать критический для развития лавины радиус $r_k = r_i + x_k$ и радиус внешнего электрода $r_a = r_i + a$. Напряженность поля в рассматриваемой точке при известном напряжении задается отношением:

$$E = \frac{\hat{u}}{r \ln \frac{r_a}{r_i}} = \frac{E_h r_i}{r}, \quad (4)$$

где E_h является максимальной напряженностью поля на внутреннем электроде. Если достигнуто пробивное напряжение $\hat{u} = \hat{u}_d$, то E_h становится максимальной напряженностью поля при пробое E_{dh} . В этом случае из (2)—(4) получается выражение:

$$(\alpha - \eta) = k \left(\frac{E_{dh} r_i}{r} - E_{di} \right), \quad (5)$$

с помощью которого можно получить условие пробоя, подставив (5) в (1):

$$k \int_{r_i}^{r_k} \left(\frac{E_{dh} r_i}{r} - E_{di} \right) dr = \ln n_k. \quad (6)$$

Если взять интеграл в (6) и ввести относительную максимальную напряженность поля при пробое

$$e_h = \frac{E_{dh}}{E_{di}}, \quad (7)$$

то получим уравнение:

$$e_h (\ln e_h - 1) = \frac{\ln n_k}{k r_i E_{di}} - 1. \quad (8)$$

Из (8) можно вычислить e_h в зависимости от внутреннего радиуса r_i и давления p , если $r_a > r_h$ (рис. 2), что для технической изоляции выполняется, так как при $1,0 \text{ атм} \leq p \leq 6,0 \text{ атм}$ и $r_i \leq 30 \text{ см}$ справедливо $x_k \leq 1,0 \text{ см}$. Однако уравнение (8) может быть решено только численно. С увеличением радиуса и с повышением давления газа относительная максимальная напряженность поля при пробое e_h уменьшается и все меньше отличается от внутренней электрической прочности.

На практике нельзя исключить, что n_k и k будут отличаться от значений, измеренных в типовом промежутке. Поэтому для применения рассчитанных кривых на практике особенно важно знать, сильно

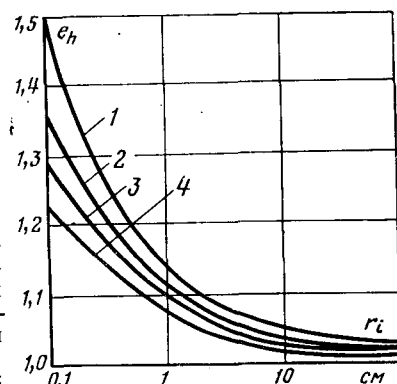


Рис. 2. Зависимость относительной максимальной напряженности поля при пробое e_h от внутреннего радиуса r_i при различных давлениях.
1 — $p = 1 \text{ атм}$; 2 — $1,5 \text{ атм}$;
3 — $2,5 \text{ атм}$; 4 — $4,0 \text{ атм}$.

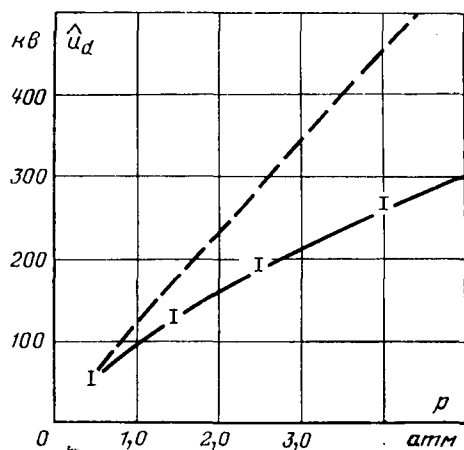


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения U_d от давления. — — — расчет по стримерному механизму; — — — расчет по предлагаемой методике; I — экспериментальные данные [Л. 7] (доверительный интервал при надежности 0,95).

ли влияют на результат расчета принятые значения для критического числа носителей заряда n_k и для наклона k кривой (рис. 1).

В связи с этим для случая, когда предвидится сильное отклонение параметров ($r_i = 1$ см, $p = 1$ атм), значение e_h было вычислено в зависимости от n_k и k . Оказалось, что изменение n_k в пределах от 10^5 до 10^{11} вызывает изменение e_h не более чем на 2,5% по сравнению со значением при $n_k = 10^8$. Изменения k в пределах от 10 до 50 кВ^{-1} вызывают отклонение величины e_h менее чем на 7,5% по сравнению с e_h для $k = 27 \text{ кВ}^{-1}$. Но так как возможные изменения n_k и k будут лежать в значительно более узком диапазоне, то на практике изменение этих параметров не должно искажать расчетные значения пробивных напряжений.

Зная e_h (рис. 2), с помощью уравнений (7) и (4) можно определить пробивное напряжение поля коаксиальных цилиндров. Для давлений $p > 1$ атм расчет не совпадает с экспериментом (доверительный интервал, изображенный на рис. 3 в виде вертикальной прямой, определен для электродов с технической шероховатой поверхностью). Ошибка вызвана использованием уравнения (3), принятым для E_{di} . Очевидно, внутренняя прочность E_{di} газа с технической точки зрения не может быть полностью реализована, так как — в частности при высоком давлении — на распределение напряженности поля на протяжении критического пути влияют различные «слабые места» (например, шероховатость электродов, частицы пыли). Расчет пробивного напряжения технической изоляции с помощью коэффициентов элементарных процессов без учета искажений поля, вызванных «слабыми местами», должен привести к неудовлетворительным результатам.

Эмпирическое определение пробивного напряжения. Так как теоретические расчеты не приводят к приемлемым результатам, то пробивное напряжение технической изоляции следует рассчитывать с использованием опытных данных. По известному соотношению Швайгера [Л. 7] пробой происходит тогда, когда максимальная напряженность поля E_h достигает определенного значения E_{hd} , зависящего

от формы напряжения, полярности и давления, а также от размеров электродов и состояния их поверхности. Если для расчета максимальной напряженности поля будет введен коэффициент использования изоляции η_F , то для пробивного напряжения справедливо выражение [Л. 1 и 7]:

$$\hat{u}_d = E_{dh} a \eta_F. \quad (9)$$

Для коаксиальных цилиндров $a = r_a - r_i$ и

$$\eta_F = \frac{r_i \ln r_a / r_i}{r_a - r_i}. \quad (10)$$

Максимальная напряженность поля при пробое E_{dh} должна быть определена экспериментально из измерений пробивного напряжения. Влияние размеров промежутка может быть исключено, если ввести относительную величину e_h — максимальную напряженность поля при пробое E_{dh} , отнесенную к технической электрической прочности E_{di} . Величина E_{di} — это значение E_{dh} , измеренное при очень больших радиусах r_i и расстояниях между электродами $a \gg x_k$ [Л. 1] или определенное по отношению:

$$E_{di} = \left(\frac{E_{dh}}{e_h} \right). \quad (11)$$

Эксперименты показали, что значения e_h удовлетворительно совпадают с рассчитанными выше (рис. 2). Для расчета технической изоляции необходимо знать связь между прочностью E_d и давлением p , чтобы с помощью уравнений (11) и (9) рассчитать пробивное напряжение. Считаясь надежными значениями технической прочности, обозначаемые E_{di} (выбранные из многочисленных собственных и известных из литературы измерений пробивного напряжения) анализировались с помощью отношения (11) для постоянного и переменного напряжений, для коммутационных перенапряжений и для импульсных напряжений. Между логарифмами значений E_{di} и p существует линейная зависимость (рис. 4), из которой было выведено эмпирическое

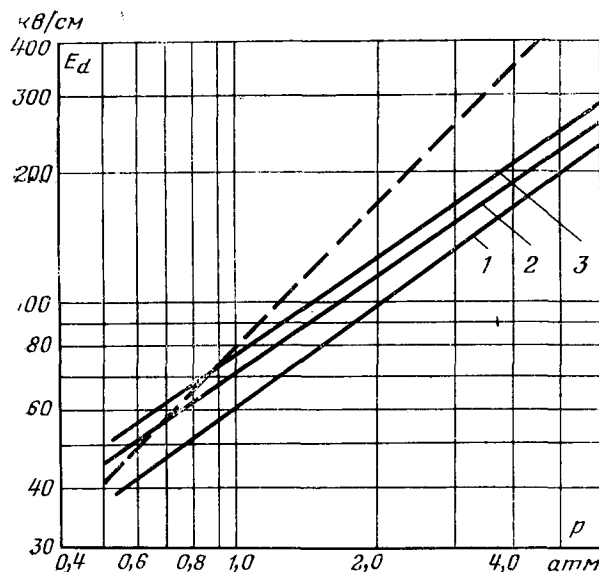


Рис. 4. Зависимость технической электрической прочности E_{di} от давления.

1 — отрицательное постоянное напряжение и напряжение промышленной частоты; 2 — коммутационный импульс; 3 — грозовой импульс; — — — внутренняя электрическая прочность E_{di} .

соотношение:

$$E_{dt} = \left(\frac{E_{di}}{p} \right)_t p^z. \quad (12)$$

Здесь $z \approx 0,7$, а отношение E_{di}/p является постоянной, зависящей от формы напряжения. Значение этой постоянной находится в диапазоне от $65 \frac{\text{кВ}}{\text{см} \cdot \text{атм}}$ (отрицательное постоянное и переменное напряжения) до $84 \frac{\text{кВ}}{\text{см} \cdot \text{атм}}$ (импульсное напряжение) (рис. 4).

Для вышеприведенного примера пробивное напряжение было рассчитано с помощью (9) и (11), исходя из технической прочности E_{dt} . Применение этого эмпирического метода расчета дает удовлетворительное совпадение между измеренными и рассчитанными значениями (рис. 3, сплошная линия).

Таким образом, предложенный метод расчета может быть применен для выбора оптимальных размеров изоляции, однако целесообразно также исследовать отклонения E_{di} от E_{dt} , которые могут иметь место на практике.

Связь между внутренней и технической электрической прочностью. Выше было высказано предположение, что разница между E_{di} и E_{dt} вызывается «слабыми местами». Имитирование таких слабых мест оказывается очень сложным; по-видимому это можно сделать воспроизводимым образом с помощью электродов с различной шероховатостью поверхности. При этом «слабые места» создаются преднамеренно, поэтому нецелесообразно исследовать только одно из них. Наоборот, следует получить такую поверхность, на которой имелось бы как можно больше приблизительно одинаковых «слабых мест». Такая поверхность может быть лучше всего охарактеризована с помощью среднего значения шероховатости [Л. 8]. Так как связь между E_{di} и E_{dt} может быть проверена только экспериментально, то было проведено большое количество опытов (200 измерений при каждом значении параметра), чтобы получить статистически достоверные значения.

Для поля коаксиальных цилиндров, исследованного при переменном напряжении ($r_a = 2,0 \text{ см}$, $r_i =$

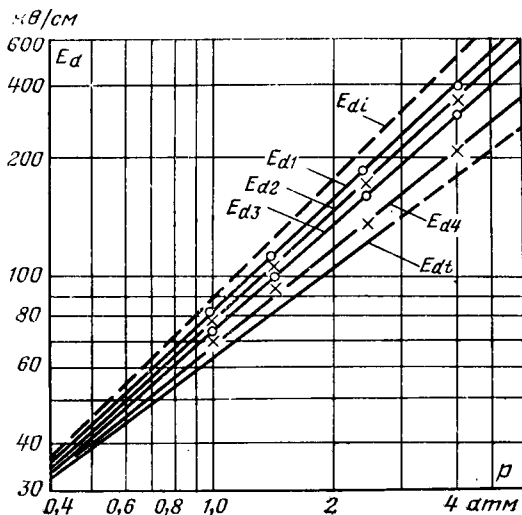


Рис. 5. Зависимость электрической прочности E_d от давления для различной шероховатости внутреннего электрода.

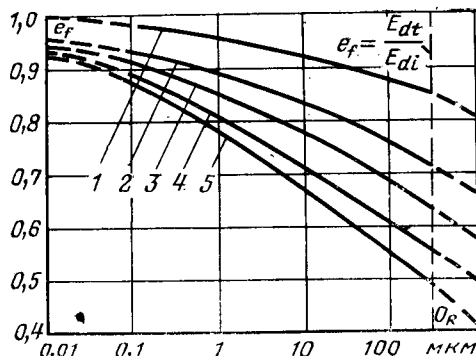


Рис. 6. Зависимость коэффициента шероховатости e_f от среднего значения шероховатости поверхности электродов O_R при различных давлениях.

1 — $p = 0,5 \text{ атм}$; 2 — $1,0 \text{ атм}$; 3 — $1,5 \text{ атм}$; 4 — $2,5 \text{ атм}$; 5 — $4,0 \text{ атм}$.

$= 0,625 \text{ см}$) пробивное напряжение уменьшается с увеличением среднего значения шероховатости, что согласуется с [Л. 9 и 10]. На основании измерений пробивных напряжений рассчитываются максимальные напряженности поля при пробое и далее с помощью e_h (рис. 2) — электрическая прочность E_d в зависимости от давления. Результаты такого анализа приведены в таблице и на рис. 5 (сплошные линии) для электродов, обработанных четырьмя различными способами.

Если на рис. 5 нанести E_{di} и E_{dt} (пунктирные линии), то становится очевидным, что определенные экспериментальные значения тем лучше согласуются с E_{di} , чем меньше среднее значение шероховатости. Из рис. 5 также видно, что кривая для E_{dt} , которая рекомендуется для оптимизации технической изоляции, с точки зрения технологически обусловленных «слабых мест» считается надежной.

Соблюдая особую тщательность при изготовлении электродов, монтаже испытательной камеры и заполнении камеры изоляционным газом, вероятно, можно получить и экспериментально такие значения E_d , которые совпадают со значениями E_{di} . Однако такие затраты на практике вряд ли себя оправдают. Технически достижимая электрическая прочность может быть представлена в виде уравнения (12). Поэтому, найдя E_{di} из выражения (3) и подсчитав коэффициент шероховатости (рис. 6)

$$e_f = \frac{(E_{di}/p)_t}{(E_{di}/p)_i} p^{z-1}, \quad (13)$$

легко можно вычислить значение E_d при заданной шероховатости по выражению:

$$E_d = e_f E_{di}. \quad (14)$$

Коэффициент шероховатости e_f должен определяться экспериментально.

E_{dh} на рис. 5	$\left(\frac{E_{di}}{p} \right)_t \frac{\text{кВ}}{\text{см} \cdot \text{атм}}$	z	Способ обработки электродов	Среднее значение шероховатости O_R , мкм
E_{d1}	84	0,96	Полировка	0,085
E_{d2}	81	0,89	Протяжка	0,550
E_{d3}	78	0,85	Пескоструйная обработка	5,0
E_{d4}	71	0,79	Насечка	36,0

Связь с эмпирически определенным пробивным напряжением может быть представлена в виде выражения:

$$\hat{u}_d = E_{di} e_h e_f \eta_f a. \quad (15)$$

В этом случае величина e_f является единственным коэффициентом, который должен определяться эмпирически из измерений пробивного напряжения, если влияние формы напряжения подробнее не рассматривается. В качестве характеристики изоляционного газа может быть принята только внутренняя электрическая прочность E_{di} . Она является величиной статистической (здесь рассматривалось ее среднее значение) и таким образом зависит от объема газа. Поэтому необходимо отнести E_{di} к заданному объему, но так как разброс очень незначителен, то для технических целей в этом необходимости нет. Напротив, E_{dt} имеет такой большой разброс, что экспериментально определенные значения E_{dt} надо обязательно отнести к заданному объему.

Выводы. 1. Если пробивное напряжение технической изоляции газом SF_6 рассчитывается по стримерному механизму с помощью «внутренней электрической прочности» E_{di} , то результат, в частности при высоких давлениях, значительно превышает измеренные значения. Если же применяется «техническая электрическая прочность» E_{dt} , определенная экспериментально для различных форм напряжений, то измерения и расчеты совпадают удовлетворительно.

2. На основании экспериментальных исследований удалось выяснить, что разница между E_{di} и E_{dt} объясняется различными «слабыми местами» (на-

пример, шероховатостью электродов, частицами пыли в газе), которые изменяют распределение напряженности поля на отрезке пути, где развиваются критические лавины. Но в любом случае процесс пробоя может быть описан стримерным механизмом. С целью учета «слабых мест» вводится коэффициент шероховатости e_f , с помощью которого при заданном давлении газа и известной шероховатости электродов значение E_{dt} может быть рассчитано из E_{di} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mosch W., Hauschild W. Eine Bedingung für den SF_6 — Durchschlag im schwach inhomogenen Feld. — «Elektrie», 1972, 26, № 9, s. 250—253.
2. Разевиг Д. В. Начальные напряжения газового разряда в электрических полях различной конфигурации. — «Электричество», 1970, № 8, с. 14—19.
3. Hauschild W., Kielmann F. Über einige grundlegende Entladungsprozesse im Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6). — «Elektrie», 26 (1972) 7, s. 198—202.
4. Nitta P., Shibuya Y. Electrical breakdown of long gaps in sulphur hexafluoride. IEEE Trans. PAS 90(1971)3, p. 1065—1071.
5. Pedersen A. Criteria for spark breakdown in sulphur hexafluoride. IEEE Trans. PAS 89(1970) 8, p. 2043—2048.
6. Залесский А. М., Полтев А. И., Виленчук А. Л. Электрическая прочность элегаза в поле коаксиальных электродов. — «Электричество», 1970, № 5, с. 83—85.
7. Schwaiger A. Elektrische Festigkeitslehre. Springer — Verlag, Berlin, 1925.
8. Erfassung der Rauheit an der Oberfläche anhand von Oberflächenschnitten. TGL 0 — 4762 (1.10.63).
9. Виленчук А. Л. Влияние материала и чистоты поверхности коаксиальных электродов на электрическую прочность элегаза. — «Электричество», 1970, № 11, с. 70—72.
10. Hogg P., Schmidt W., Strasser H. Dimensioning of SF_6 metalclad switchgear to ensure high reliability. CIGRE, 23—10 (1972).

[5.10.1073]



УДК 621.315.1

Напряжения, индуцированные на автотранспорте в электрическом поле ВЛ

ГОНЧАРИК Е. П.

Минск

Значения индуцированного потенциала (по отношению к земле) на проводящем объекте, находящемся под воздушной линией электропередачи (ВЛ) или вблизи нее, и стекающего с объекта тока пропорциональны величине напряжения линии и размерам объекта. Следовательно, значимость явлений и последствий электростатической индукции увеличивается с ростом уровней напряжений ВЛ. В настоящее время работают ВЛ напряжением 750 кВ, проектируется ВЛ 1150 кВ, а в перспективе предусматривается еще более высокий уровень напряжений. Непрерывно повышается плотность нагрузки, растет протяженность сети сверхвысокого напряжения (СВН) и, следовательно, увеличивается вероятность появления и длительного пребывания человека и техники в зоне действия сильных электрических полей.

С вводом в действие подстанций СВН появились жалобы обслуживающего персонала на ухудшение

самочувствия, в связи с чем был разработан комплекс защитных мероприятий для защиты обслуживающего персонала от вредного влияния электрического поля и разрядов на человеческий организм [Л. 1 и 2]. Что касается техники безопасности расположения в зоне создаваемого ВЛ электрического поля инженерных сооружений, транспорта, сельскохозяйственных машин и прочих изолированных от земли объектов, то эти вопросы далеки от полного решения. Исследования [Л. 3 и 4] показали, что эти вопросы нельзя исключать из рассмотрения при проектировании и эксплуатации ВЛ СВН.

Потенциалы на проводящих объектах произвольной формы, находящихся в электрическом поле ВЛ СВН и токи, стекающие с этих объектов на землю, могут быть найдены экспериментально или путем физического моделирования [Л. 5], а также расчетным методом [Л. 3 и 6]. Наиболее универсальным, естественно, является расчетный метод.

Токи, стекающие с объекта [Л. 3], находятся из решения системы четырех уравнений Максвелла для системы заряженных тел: три провода — объект. Особенностью методики [Л. 3] является то, что частичные емкости линия — объект, условно разбиты на две части: емкость, обусловленная длиной объекта, и краевая емкость, обусловленная размерами торцов объекта. Последняя найдена эмпирическим путем так же, как и эквивалентный радиус цилиндра, которым заменяется объект, в результате экспериментов на воздушной лабораторной модели с прямоугольниками квадратного сечения.

Не останавливаясь на ряде допущений, принятых в [Л. 3], укажем, что эта методика применима только к объектам прямоугольной формы, расположенным параллельно оси ВЛ, для определения лишь индуцированных токов. Возможность расчета наведенных потенциалов [Л. 3] не рассматривается.

В [Л. 6] потенциалы и заряды на проводящем объекте рассчитываются по заданному распределению зарядов в пространстве. Этим способом можно рассчитать потенциалы и заряды (токи) на объектах произвольной формы и при любой ориентации относительно оси ВЛ. Точность его зависит от числа разбиений, которое лимитируется памятью ЦВМ. Представление объекта 80 зарядами требует 50 тыс. ячеек памяти, что более чем в 6 раз превышает оперативную память машин класса «Минск-22». Разбиение на 22 части ограничивается 7 тыс. ячеек памяти и для ящика размером $10 \times 2,44 \times 3,66 \text{ м}^3$ позволило [Л. 6] рассчитать ток с точностью до 1%, а потенциал — до 35%. Очевидно, что громоздкость метода не оправдывается достигаемой при его реализации точностью прогнозов.

В статье предлагается методика расчетного определения наведенных потенциалов на автомобилях разного типа, расположенных соосно с ВЛ, и токов, стекающих с автотранспорта, при замыкании их корпуса на землю. Задача решается путем эквивалентирования симметричной трехфазной системы напряжений и объекта в однолинейную цепь с последующим нахождением распределения напряжения между емкостями линия-объект и объект-земля.

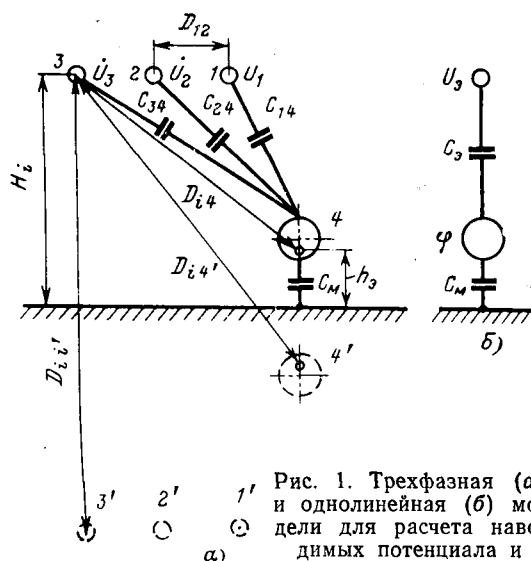


Рис. 1. Трехфазная (а) и однолинейная (б) модели для расчета наводимых потенциалов и тока.

Ток, стекающий с автомобиля, находится по известным напряжению и емкостям автомобиля по отношению к земле и проводам ВЛ. При этом предполагается, что проводимость машины чисто емкостная, трехфазная система напряжений симметрична, среда нахождения зарядов однородна, что в практике близко к истине. Влиянием тросов пренебрегаем, что приводит к погрешности до 1—3% [Л. 3].

При очевидной простоте такая методика дает возможность оценить уровень наводок на автомобилях в зоне влияния электростатических полей ВЛ с достаточной для практических целей точностью (несколько процентов) и пригодна для ручного и автоматического счета.

Представим находящийся в поле ВЛ реальный объект (автомобиль) эквивалентным цилиндром, имеющим равные с объектом длину, емкость и потенциал относительно земли (рис. 1).

Частичная емкость провод — цилиндр (без учета влияния других проводов)

$$C_{i4} = \frac{\alpha_{i4}}{\alpha_{ii}\alpha_{44} - \alpha_{i4}^2}. \quad (1)$$

Учитывая, что собственные и взаимные потенциальные коэффициенты на единицу длины определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ii} &= \frac{1}{l} 18 \cdot 10^9 \ln \frac{r_{ii'}}{r_0} \\ \alpha_{44} &= \frac{1}{l} 18 \cdot 10^9 \ln \frac{2h_3}{r_m} \\ \alpha_{i4} &= \frac{1}{l} 18 \cdot 10^9 \ln \frac{D_{i4'}}{D_{i4}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

найдем для наиболее характерного в настоящее время конструктивного исполнения ВЛ СВН (одноцепная ВЛ) частичные емкости фаза — цилиндр (в нф):

$$C_{i4} \approx \frac{55,6l \ln \frac{D_{i4'}}{D_{i4}}}{\ln \frac{D_{ii'}}{r_0} \ln \frac{2h_3}{r_m} - \left(\ln \frac{D_{i4'}}{D_{i4}} \right)^2}, \quad (3)$$

где l — длина цилиндра; h_3 — расстояние от земли до электрической оси цилиндра; r_m — радиус цилиндра; $r_0 = \sqrt[n]{r_0 d^{n-1}}$ эквивалентный радиус расщепленной фазы; d, r_0 — среднегеометрическое расстояние между проводами в пучке и их радиус; D_{i4} — расстояния между i -м проводом и электрической осью цилиндра; $D_{ii'}$, $D_{i4'}$ — расстояния между i -м проводом и его зеркальным изображением в плоскости земли и соответственно между изображением цилиндра (все расстояния в (3) в м).

В выражении (3) все линейные расстояния определяются размерами цилиндра, его удалением от оси линии, габаритами ВЛ и расположением проводов на опоре (рис. 1, а). Например, для ВЛ с горизонтальным расположением проводов $D_{ii'} = 2H_i$, где H_i — истинное расстояние от провода до земли в месте расположения под ним цилиндра.

Эквивалентирование трехфазной системы в однофазную выполняется известным способом — приравнованием токов в обеих системах, протекающих через емкость цилиндра C_m . При симметричности трехфазной системы эквивалентное напряжение

с приемлемой для практических целей точностью определяется по выражению [Л. 7]:

$$\dot{U}_3 = \frac{U_\phi}{C_3} (C_{14} + a^2 C_{24} + a C_{34}); \quad (4)$$

$$C_3 = C_{14} + C_{24} + C_{34},$$

где U_ϕ — фазное напряжение; a — оператор поворота фазы.

Модуль эквивалентного напряжения

$$U_3 = \sqrt{\operatorname{Re} U_3^2 + \operatorname{Im} U_3^2} \quad (5)$$

используется для определения потенциала на цилиндре (рис. 1, б):

$$\varphi = \frac{U_3 C_3}{C_3 + C_m}, \quad (6)$$

где C_m — емкость между цилиндром и землей, определенная в системе проводов влияющей линии.

Выражение (4) получено в предположении, что сопротивление объекта относительно земли значительно меньше емкостного сопротивления между системой проводов и объектом. Такое допущение, не вносит существенной ошибки в расчет, одновременно позволяет рассчитать ток замыкания корпуса автотранспортного средства на землю, не зная его емкости, что в ряде случаев значительно упрощает задачу.

Учитывая, что систему проводов с емкостным сопротивлением между линией и объектом можно рассматривать как источник тока, у которого внутреннее сопротивление намного выше сопротивления нагрузки, ток, протекающий через эквивалентную емкость, определим

$$I = U_3 \omega C_3. \quad (7)$$

Многочисленные измерения показали, что емкость отечественного автотранспорта лежит в пределах 1000—2500 пф, а сопротивление шин в зависимости от погоды и их состояния колеблется от нескольких килоом при дожде до сотен мегаом в сухую погоду. Расчетное сопротивление тела человека обычно принимается 1 ком, а переходное сопротивление верхнего слоя грунта под ногами 1,5 ρ (ρ — удельное сопротивление верхнего слоя покрытия в ом. м). Следовательно, практически для всех грунтов в сухую погоду основная часть тока будет стекать через

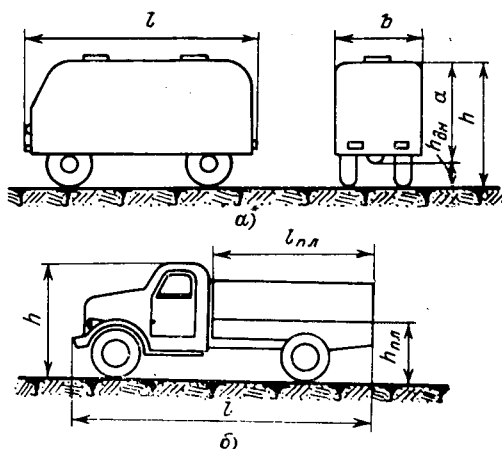
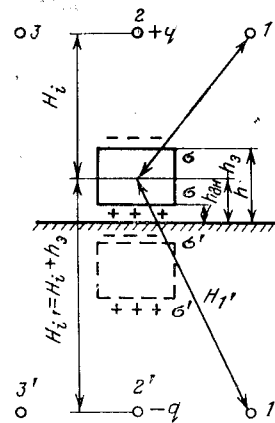


Рис. 2. Размеры автомобилей.

l — длина; h — высота; b — ширина; $h_{дн}$ — просвет; a — высота кузова; $l_{пл}$ — длина платформы; $h_{пл}$ — погрузочная высота.

Рис. 3. К определению высоты электрической оси объекта над поверхностью земли.



человека, коснувшегося автотранспорта, в пределе приближаясь к значению, рассчитанному по формуле (7). Практически этот же ток фиксируется амперметром при экспериментальных измерениях под ВЛ.

Приведенные выше выкладки можно применить к любому проводящему объекту конечных размеров, изолированному от земли и находящемуся в зоне влияния поля ВЛ, если его можно заменить эквивалентным цилиндром, имеющим равные с объектом емкость и потенциал относительно земли. Применительно к автомобилю с идеальной изоляцией шин радиус эквивалентного цилиндра определим, приравняв объемы пространства, занимаемого внешним контуром автомобиля и эквивалентным цилиндром одной длины с автомобилем:

$$r_m = \sqrt{\frac{V}{\pi l}}$$

или

$$r_m = \sqrt{\frac{abk}{\pi}}, \quad (8)$$

где a , b , l — габариты автомобиля (рис. 2); k — коэффициент заполнения объема, равен отношению объема V , занимаемого внешними контурами автомобиля к объему параллелепипеда размерами $a \times b \times l$.

Известно, что электрическое поле вне цилиндра можно заменить полем фиктивной заряженной оси. С некоторым приближением это применимо и для автомобилей (объектов) больших размеров правильной геометрической формы, поверхность которых можно рассматривать близкой к цилиндрической. Определим расположение фиктивной заряженной оси, заменяющей реальный объект, находящийся в поле ВЛ. Для этого, пренебрегая искажением поля у концов объекта, запишем выражения для напряженности электрического поля на уровне фиктивной оси (электрической оси) от зарядов проводов фаз и от наведенных на объекте зарядов:

$$E_{i=3} = \frac{+q}{2\pi\epsilon H_i}; \quad E_4 = \frac{-\sigma}{2\pi\epsilon (h - h_3)}; \quad E_5 = \frac{+\sigma}{2\pi\epsilon (h_3 - h_{дн})},$$

и соответственно от изображения этих зарядов

$$E_{i=3}^* = \frac{-q}{2\pi\epsilon H_i'}, \quad E_9 = \frac{-\sigma}{2\pi\epsilon (h_3 + h_{дн})}, \quad E_{10} = \frac{+\sigma}{2\pi\epsilon (h + h_3)},$$

где E — напряженность электрического поля; σ — поверхностная плотность заряда на объекте и его изображении; q — линейная плотность заряда на проводах линии и на их изображении; H_i , $h - h_3$ и т. д. — расстояния от соответствующего заряда до точки, в которой определяется напряженность поля, создаваемая данным зарядом (рис. 3); h — высота

объекта; $h_{\text{дн}}$, h_a — расстояние от земли до дна и соответственно до электрической оси объекта.

Суммарная напряженность, создаваемая системой зарядов внутри проводящей оси, которой мы заменили реальный объект, равна нулю, т. е.

$$\sum_{k=1}^{10} E_k = 0. \quad (9)$$

Если допустить, что $E_i \approx E_i^*$ (что близко к истине, когда $h_a \ll H_i$), уравнение (9) примет вид:

$$\frac{1}{h_a - h_{\text{дн}}} - \frac{1}{h - h_a} + \frac{1}{h + h_a} - \frac{1}{h_a + h_{\text{дн}}} = 0. \quad (10)$$

Результаты решения этого уравнения, используемые при определении h_a и C_{14} :

$h_{\text{дн}}/h$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
h_a/h	0,265	0,331	0,375	0,411	0,439	0,498	0,545	0,586	0,621	0,654	0,685	0,714	0,743	0,797	0,849	0,899	0,949	1

По изложенной методике были рассчитаны потенциалы и токи для девяти типов автомобилей и сопоставлены с непосредственными измерениями под ВЛ 330 кВ с горизонтальным расположением проводов. Измерения на разном удалении от ВЛ были выполнены при изоляции автомобиля от земли диэлектрическими ковриками с целью создания идентичных условий на протяжении всего времени эксперимента, так как шины при езде по траве и влажному грунту очень быстро увлажняются, и их проводимость сильно увеличивается. При этом ток замыкания корпуса автомобиля на землю изменялся незначительно, а потенциал очень резко падал (табл. 1), что приводит к несоответствию условий эксперимента и расчета и исключает их сопоставление. Применение качественного диэлектрика дополнительно к изоляции шин позволяет стабильно измерять предельно возможный уровень наводок, в то время как измерения без дополнительной изоляции дают фактические значения, зависящие от целого ряда случайных факторов: состояния и влажности шин и грунта, площади и качества контакта шин с землей и др.

В качестве иллюстрации на рис. 4 сопоставлены результаты расчетов по формулам (6) и (7) с натурным экспериментом для автобуса УАЗ-452В (рис. 2,а) и автомобиля ГАЗ-51 (рис. 2,б). Наибольшее отклонение измеренных значений потенциалов и токов от расчетных в большинстве слу-

чаев наблюдаются для небольших машин сложной конфигурации и не превышает 10—15%. В [Л. 5] приведены результаты эксперимента с металлизированным ящиком размерами $12 \times 2,4 \times 3 \text{ м}^3$ под ВЛ 735 кВ. Расчетные значения тока по формуле (7) хорошо согласуются с экспериментальными данными [Л. 5].

Для машин, имеющих тент из изоляционного материала (брезент, дерево) наводки выше по сравнению с теми же автомобилями без тента. Одной из причин этого, по-видимому, является увеличение диэлектрической проницаемости среды по сравнению с воздухом.

При расположении автомобилей под углом к линии наводки на них, как правило, несколько ниже.

Таблица 1

Значения измерительных потенциалов и токов замыкания на землю (через сопротивление 2,5 ком) корпуса автолаборатории (на базе автомобиля ГАЗ-51) под ВЛ 330 кВ с $H_i=8,8 \text{ м}$, расстоянием между фазами 8,4 м и проводом $2 \times \text{АСО}=400/40$

Расстояние от оси линии до оси машины, м	Потенциал при изоляции автомобиля от земли ковриком*, кВ	Ток при эксперименте, мкА	
		с ковриком	без коврика
8,4	2,15	1050	1000
12,4	2,08	950	930
16,5	1,15	600	595
22,5	0,6	290	263
30,5	0,3	125	110

* Потенциал при отсутствии коврика не превышал 0,1 кВ.

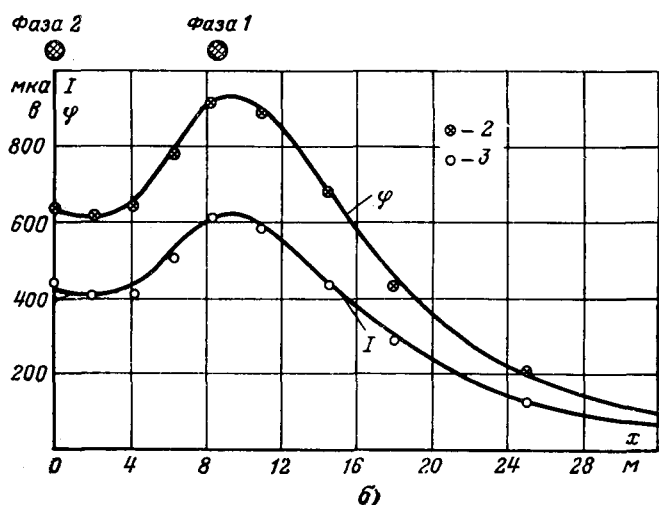
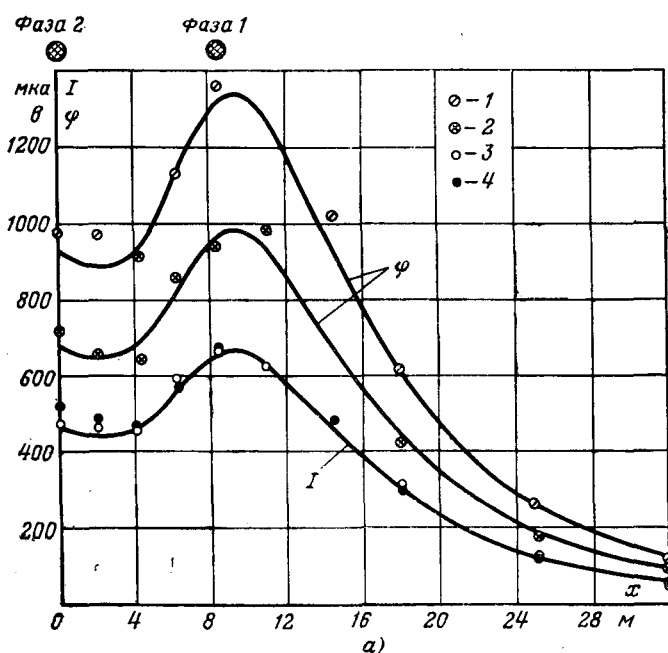


Рис. 4. Расчетные значения потенциалов ϕ и токов I замыкания на землю корпуса автомобилей УАЗ-452В (а) и ГАЗ-51 (б) под ВЛ 330 кВ.

1 и 2 — экспериментальные значения ϕ ; 3 и 4 — то же I .
1 и 4 — емкость УАЗ-452В равна 1574 пФ; 2 и 3 — 2150 пФ.

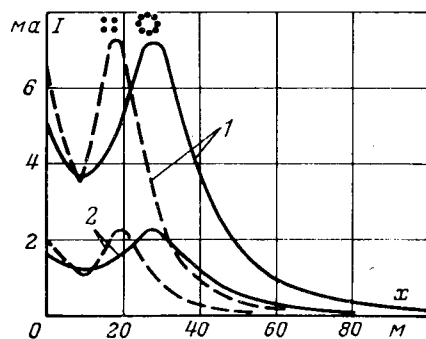


Рис. 5. Расчетные значения тока замыкания корпуса автомобилей ЛИАЗ-677 (кривые 1) и АЦ-1,9-51А (кривые 2) на расстоянии x , м от оси линии.

--- ВЛ класса 750 кВ; — ВЛ класса 1150 кВ.

Для оценки уровней электростатических наводок, возникающих на транспорте в местах их работы вблизи линий 750 и 1150 кВ. Были рассчитаны потенциалы и токи для нескольких типов машин. В табл. 2 приведены рассчитанные по формулам (6) и (7) значения наводок вблизи крайней фазы в середине пролета ВЛ класса 750 и 1150 кВ.

Габариты линий выбраны из расчета, чтобы напряженность электрического поля на уровне 1,8 м над землей не превышала 20 кВ/м. Максимальные наводки под этими линиями практически одинаковы с той лишь разницей, что при удалении транспортного средства от линии 750 кВ они быстрее затухают (рис. 5). В реальных условиях за счет проводимости шин потенциалы будут в несколько раз ниже указанных в табл. 2 значений, а токи, стекающие с автомобиля, останутся того же порядка, достигая для крупногабаритных автотранспортных средств 7 мА. При удалении механизма от линии наводки на нем резко снижаются, что отчетливо видно на рис. 5.

Как видно из табл. 2, токи, стекающие с автомобиля непосредственно под линией, превышают пороговое раздражающее значение. Кроме того, между разнопотенциальными человеком и автотранспортом возможны разряды, которые будут нарушать гигие-

Таблица 2

Тип автомобиля	Габариты машин, м				Емкость машины — земля, пФ	Ток, мА	Потенциал, кВ
	Длина l	Ширина b	высота h	просвет $h_{дн}$			
ЛИАЗ-677	10,45	2,53	2,98	0,345	1790	7,2	12,5
АЦ-1, 9-51А	5,48	2,1	2,13	0,245	982	2,26	7,2
ТЗ-200	7,7	2,65	2,70	0,290	1377	3,57	8,0
АЦМ-4-157К	6,75	2,3	2,68	0,310	1076	3,28	9,5
АЦЖНГ-4-164А	6,68	2,23	2,44	0,265	1073	3,13	9,1
АЦП-3,7	6,7	2,32	2,57	0,265	1173	2,8	7,6
C-652	13,32	2,7	3,75	0,46	966	6,3	19,8

ну труда. Поэтому при работах транспортных средств и сельскохозяйственных машин на пневматическом ходу под ВЛ класса 750 и 1150 кВ необходимо их заземлять.

Вопросы установления габаритов машин, погодных и других условий, при которых потребуются заземление механизмов, требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок электрических станций и подстанций. М., «Энергия», 1972.
2. Нормы и правила по охране труда при работах на подстанциях и воздушных линиях электропередачи напряжением 400, 500 и 750 кВ переменного тока промышленной частоты. М., СЦНТИ ОРГРЭС, 1972.
3. Rene J. G., Cimsa R. P. Computer analysis of electrostatically induced currents on finite object by EHV transmission lines.— «IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems», 1968, 87, № 4.
4. Barthold L. O., Lambert E. C., Finney W. G., Lemire W. A. R., Schlomann R. H., Zaffanella L. E. Electrostatic effects of overhead transmission lines.— «IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems», 1972, 91, № 2.
5. Cimsa R. P., Rene J. G. Air model for the study of electrostatic induction by transmission lines.— «IEEE, Transactions of Power Apparatus and Systems», 1968, 87, № 4.
6. Tranen J. D., Wilson G. L. Electrostatically induced voltages and currents on conducting object under EHV transmission lines.— «IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems», 1971, 90, № 2.
7. Пенович Е. И., Чесноков Н. М. Защита персонала, работающего в условиях полей высокого напряжения.— «Электрические станции», 1969, № 9.

[25.1.1974]



УДК 621.314.69.017.1

Учет влияния тока утечки на процесс заряда емкостного накопителя

ДАНИЛЕВИЧ О. И.

Харьков

В последнее время с целью повышения к. п. д. процесса заряда емкостного накопителя все шире применяются зарядные выпрямители, в которых величина зарядного тока ограничивается с помощью индуктивного сопротивления, включаемого последовательно в питающую цепь выпрямителя [Л. 1—3]. Требуемая величина индуктивного сопротивления ωL наиболее часто достигается путем

соответствующего увеличения индуктивности рассеяния обмоток повышающего трансформатора зарядного выпрямителя.

Исследование зарядных выпрямителей с индуктивным токоограничением проводилось без учета тока утечки емкостных накопителей [Л. 1—3]. Однако при использовании емкостных накопителей с полярным диэлектриком в высоковольтных за-

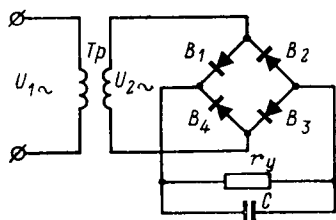


Рис. 1.

рядных установках и в других случаях [Л. 4] пренебрежение проводимостью утечки конденсаторов приводит при определении времени заряда емкостного накопителя и, следовательно, параметров повышающего трансформатора и вентилей зарядного выпрямителя к недопустимым погрешностям. Известный графический метод определения зависимости напряжения на заряжаемом емкостном накопителе U_c от времени заряда t с учетом тока утечки [Л. 4] вносит дополнительную погрешность в вычисления и требует при каждом новом значении проводимости утечки g_y повторять громоздкие графические построения.

Вместе с тем, для наиболее часто применяемых зарядных выпрямителей с индуктивным токоограничением, выполненных по однофазной и трехфазной мостовым схемам выпрямления и, следовательно, по однофазным схемам с удвоением напряжения и с нулевым выводом, при времени заряда, превышающем несколько десятков периодов напряжения питающей сети, могут быть получены сравнительно простые аналитические выражения, которые позволяют определить с точностью до 3—5% время заряда t накопителя емкостью C до напряжения U_c с учетом тока утечки конденсаторов.

При установлении указанных зависимостей будем пренебрегать активным сопротивлением r обмоток и намагничивающим током повышающего трансформатора зарядного выпрямителя, свободной составляющей зарядного тока, которая при реальном отношении r/L практически затухает через несколько периодов после включения выпрямителя. Вентили выпрямительной схемы будем рассматривать как идеальные.

Покажем на примере однофазного мостового зарядного выпрямителя (рис. 1), что для определения времени заряда емкостного накопителя можно использовать известные зависимости $I_d(E_d)$ среднего значения выпрямленного тока I_d выпрямителя от противо-э. д. с. E_d его нагрузки при отсутствии активного сопротивления и сглаживающего дросселя в цепи выпрямленного тока.

В однофазном мостовом зарядном выпрямителе при $r_y = 1/g_y = \infty$ среднее за полупериод сети значение зарядного тока $I'_{c\text{ ср}}$, равное среднему значению выпрямленного тока I_d' , определяется по выражению:

$$I'_{c\text{ ср}} = I'_d = \frac{1}{\pi} I_{2m} \left[\sin \alpha - \sin(\alpha + \lambda) - 2 \frac{U_{c0}}{U_{2m}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \sin^2 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{\lambda}{2} + 2 \left(\frac{U_{c0}}{U_{2m}} - \sin \alpha \right) \sin^2 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{\lambda}{2} + \frac{\omega}{\omega_0} \cos \alpha \sin \frac{\omega_0}{\omega} \lambda \right], \quad (1)$$

где U_{2m} — амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора выпрямителя; α — угол открывания вентилей выпрямительной схемы; λ — угол проводимости вентилей; U_{c0} — напряжение на заряжаемом емкостном накопителе в момент открывания вентилей; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ — частота собственных колебаний цепи;

$$I_{2m} = \frac{U_{2m}}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}.$$

В рассматриваемых установках частота сети $\omega \gg \omega_0$. Действительно, пусть напряжение на емкостном накопителе в конце заряда $U_{cк}$ составляет $0,75U_{2m}$, а среднее за время заряда значение зарядного тока $I_{c\text{ ср}} = 0,35I_{2m}$. Тогда

$$0,75U_{2m} = \frac{1}{C} 0,35 \frac{U_{2m}}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} t_3 \quad \text{или} \quad \frac{\omega}{\omega_0} \approx 0,7 \sqrt{\omega t_3}.$$

При $\omega = 314 \text{ сек}^{-1}$ и $t_3 > (0,8 \div 1,0) \text{ сек}$ получим $\omega/\omega_0 > 11$.

Учитывая последнее неравенство, приведем зависимость (1) к более простому виду:

$$I_{c\text{ ср}} = I_d = \frac{1}{\pi} I_{2m} \left[\sin \alpha - \sin(\alpha + \lambda) - \frac{U_{c0}}{U_{2m}} \frac{\lambda^2}{2} + \lambda \cos \alpha \right]. \quad (2)$$

Если положить, что $I_{2m} = U_{2m}/\omega L$ (ошибка при этом не превысит 0,8%), то выражение (2) будет совпадать с выражением для среднего значения выпрямленного тока I_d выпрямителя, работающего на противо-э. д. с. $E_d = U_{c0}$ [Л. 5]. В этом случае среднее за полупериод значение зарядного тока можно вычислить с точностью около 2% в начале и до нескольких десятых процента в конце заряда. Поэтому известная зависимость $I_d(E_d)$ среднего значения выпрямленного тока I_d выпрямителя от противо-э. д. с. E_d его нагрузки при отсутствии активного сопротивления и сглаживающего дросселя в цепи выпрямленного тока может с достаточной степенью точности рассматриваться и как зависимость $I_d(U_c)$ среднего значения зарядного тока $I_{c\text{ ср}} = I_d$ от напряжения U_c на емкостном накопителе.

Время заряда емкостного накопителя с точностью до долей продолжительности полупериода напряжения сети можно определить, заменив действительную кривую зарядного тока $i'_c = i'_d$ (рис. 2) ступенчатой $i_{d\text{ ст}}$, составленной из средних значений выпрямленного тока для каждого полупериода, вычисленных по выражению (1). Тогда напряжение на емкостном накопителе в течение полупериода будет изменяться линейно, а приращение напряжения за полупериод будет определяться площадью прямоугольника ($0ab t_1$, $t_1 b_1 c t_2$ и т. д.), образующего ступеньку, и равно действительному приращению. Заменим далее ступенчатую функцию $i_{d\text{ ст}}$ плавной $i_{d\text{ п}}$, проходящей через точки a_2 , b_2 , c_2 и т. д. (рис. 2), соответствующие величинам I_d , вычислен-

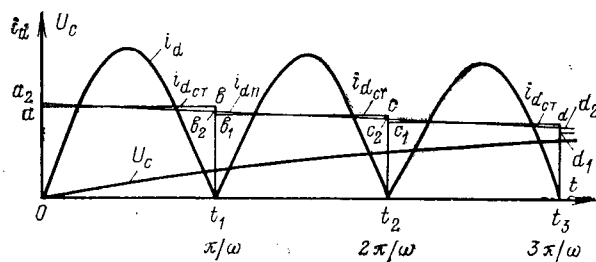


Рис. 2.

ным по (2) для значений U_c в конце каждого полупериода. Такая замена, предполагающая заряд емкостного накопителя условным током $I_d(U_c)$, плавно уменьшающимся по мере заряда конденсатора, практически не снизит точность расчетов, поскольку площади, определяющие прирост напряжения U_c за полупериод, и в случае ступенчатой функции, и в случае плавной, примерно равны друг другу. Отсюда вытекает возможность определения времени заряда емкостного накопителя в результате решения дифференциального уравнения:

$$dU_c = \frac{1}{C} I_d(U_c) dt.$$

Покажем, что зависимости $I_d(E_d)$ могут быть использованы и при определении времени заряда и параметров зарядных выпрямителей с учетом тока утечки емкостных накопителей.

Пусть величина сопротивления утечки r_y (рис. 1) относительно невелика и составляет $r_y = 10\omega L$. Тогда постоянная времени цепи $r_y C$ при питании зарядного выпрямителя от сети промышленной частоты составит $\tau = r_y C \approx 5$ сек. При таком значении τ изменение напряжения емкостного накопителя за полупериод вследствие утечки даже при отключенном зарядном выпрямителе не превышает 0,1% и, следовательно, среднее за полупериод значение выпрямленного тока I_d выпрямителя может быть вычислено по (2). Это позволяет, как и при отсутствии утечки, действительную кривую выпрямленного тока заменить плавной кривой $i_{dп} = I_d(U_c)$. Тогда мгновенное значение условного зарядного тока будет равно:

$$i_{cn}(U_c) = I_d(U_c) - g_y U_c.$$

Зависимость напряжения на заряжаемом емкостном накопителе от времени заряда может быть найдена в результате решения дифференциального уравнения:

$$dU_c = \frac{1}{C} i_{cn}(U_c) dt = \frac{1}{C} [I_d(U_c) - g_y U_c] dt. \quad (3)$$

Все дальнейшие вычисления будем вести в относительных единицах, приняв за базисное напряжение амплитуду линейного напряжения вторичной обмотки повышающего трансформатора зарядного выпрямителя $U_6 = U_{2лм}$, за базисный ток — амплитуду фазного тока короткого замыкания трансформатора $I_6 = \frac{U_{2лм}}{\omega L}$, за базисную проводимость — $g_6 =$

$\frac{1}{\omega L}$, за базисное время — $t_6 = \omega LC$, за базисную мощность — среднюю мощность, потребляемую емкостным накопителем, $P_6 = \frac{CU_{ск}^2}{2I_6}$.

Рассмотрим однофазный мостовой зарядный выпрямитель (рис. 1).

Как показано в [Л. 2 и 3], амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2лм}$ должна превышать номинальное напряжение заряженного емкостного накопителя $U_{ск}$ на 25—40%, т. е. величина $U_{ск}^*$ должна находиться в пределах 0,7—0,8. Отсюда следует [Л. 2], что зарядный выпрямитель в процессе заряда емкостного накопителя работает не только в режиме непрерывного тока (при $0 \leq U_c^* \leq U_{ск}^* = 0,537$), но и в режиме прерывистого тока заряда (при $U_c^* > 0,537$).

В режиме непрерывного тока зависимость $I_d^*(U_c^*)$ имеет следующий вид [Л. 2]:

$$I_d^*(U_c^*) = \sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^2 - U_c^{*2}}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (3), записанное в относительных единицах, и решая полученное уравнение, найдем следующую зависимость $t^*(U_c^*)$ для режима непрерывного тока заряда:

$$t^* = \frac{1}{1 + g_y^*} \left\{ \arctg \frac{\pi U_c^*}{\sqrt{4 - (\pi U_c^*)^2}} - g_y^* \ln \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{2} U_c^*\right)^2} - \frac{\pi}{2} g_y^* U_c^* \right] \right\}. \quad (5)$$

Очевидно, что зависимость (5) справедлива при $g_y^* < \sqrt{\left(\frac{2}{\pi U_c^*}\right)^2 - 1}$. Продолжительность заряда емкостного накопителя до напряжения, соответствующего переходу в режим прерывистого тока, если $g_y^* < \sqrt{\left(\frac{2}{\pi U_{ск}^*}\right)^2 - 1} = 0,6367$, составит:

$$t_{п1}^* = \frac{1}{1 + g_y^*} [1,004 - g_y^* \ln(0,537 - 0,8435 g_y^*)]. \quad (6)$$

В режиме прерывистого тока, при $U_c^* > 0,537$, угол проводимости вентилей $\lambda < \pi$ вычисляется в результате решения трансцендентного уравнения [Л. 2]:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \lambda) - U_c^* \lambda = 0.$$

Среднее значение выпрямленного тока определяется по выражению:

$$I_d^* = \frac{1}{\pi} \left[\sin \alpha - \sin(\alpha + \lambda) + \lambda \cos \alpha - \frac{U_c^*}{2} \lambda^2 \right]. \quad (7)$$

Поскольку в режиме прерывистого тока заряда зависимость $I_d^*(U_c^*)$, являющаяся продолжением зависимости $I_d^*(U_c^*)$ для режима непрерывного тока (рис. 3), аналитически точно не выражается, выбираем для участка $0,537 < U_c^* < 0,85$ аппрокси-

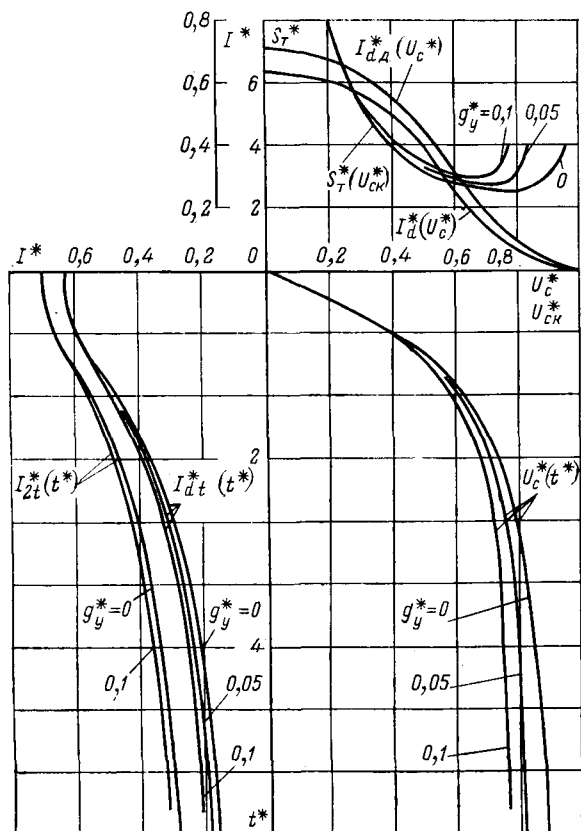


Рис. 3.

в [Л. 2], зависимости от времени t^* среднего $I_{dt}^*(t^*)$ и действующего $I_{2t}^*(t^*)$ за время t^* значений выпрямленного тока, а также зависимость $S_T^*(U_{ck}^*)$ типовой мощности S_T^* трансформатора зарядного выпрямителя от относительной величины конечного напряжения U_{ck}^* на емкостном накопителе (рис. 3).

Приведенные на рис. 3 зависимости могут быть использованы для определения оптимальных параметров зарядных выпрямителей с учетом тока утечки емкостных накопителей.

Проанализируем работу трехфазного мостового зарядного выпрямителя (рис. 4).

Трехфазный мостовой выпрямитель, к выводам выпрямленного напряжения которого непосредственно присоединена безындуктивная нагрузка, характеризующаяся только одной величиной противо-э. д. с., может работать в трех различных режимах. Границы этих режимов, как нетрудно показать, определяются следующими значениями противо-э. д. с. в относительных единицах: $1,0 \div 0,95$; $0,95 \div 0,746$; $0,746 \div 0$. Так, верхнее E_{dv}^* и нижнее E_{dn}^* граничные значения противо-э. д. с. нагрузки во втором режиме работы можно вычислить по выражению [Л. 6]:

$$E_d^* = \frac{L_d}{L} \sin \alpha + \sqrt{3} \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right),$$

где L_d — индуктивность цепи нагрузки.

Как показано в [Л. 6], при $L_d = 0$ граничным значениям E_{dv}^* и E_{dn}^* соответствуют естественные углы открывания вентилей $\alpha_B = 3,4^\circ$ и $\alpha_H = -4,5^\circ$ и, следовательно, $E_{dv}^* = 0,95$, $E_{dn}^* = 0,746$.

Обычно амплитуда линейного напряжения вторичной обмотки повышающего трансформатора не превышает $1,2U_{ck}$, т. е. $U_{ck}^* < 0,85$. Отсюда следует, что трехфазный мостовой зарядный выпрямитель работает либо только в третьем режиме, либо только в третьем и во втором. В третьем режиме работы зависимость $I_d^*(U_c^*)$ может быть представлена следующим уравнением:

$$I_d^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{27}{4\pi^2} - U_c^{*2}}. \quad (11)$$

Отсюда нетрудно получить выражение для времени заряда емкостного накопителя с учетом тока утечки конденсатора, справедливое при

$$g_y^* < \sqrt{\frac{0,304}{U_c^{*2}} - 0,4444}:$$

$$t^* = \frac{3}{2 + 4,5g_y^{*2}} \left[\arctg \frac{2\pi U_c^*}{\sqrt{27 - (2\pi U_c^*)^2}} - 1,5g_y^* \ln \left(\sqrt{1 - \frac{(2\pi U_c^*)^2}{27}} - \frac{\pi}{\sqrt{3}} g_y^* U_c^* \right) \right]. \quad (12)$$

Продолжительность заряда емкостного накопителя до напряжения, соответствующего переходу из третьего режима во второй (до $U_c^* = 0,746$), при

мирующий многочлен:

$$I_d^* = a_1 U_c^{*2} + b_1 U_c^* + c_1, \quad (8)$$

где $a_1 = 1,773$; $b_1 = -3,444$; $c_1 = 1,68$.

Как показали расчеты, погрешность при вычислении тока I_d^* на участке $0,537 < U_c^* < 0,85$ по (8) не превышает 1%.

Аппроксимирующий многочлен (8) позволяет легко определить продолжительность t_3^* заряда емкостного накопителя до конечного напряжения U_{ck}^* , превышающего $U_{cn}^* = 0,537$.

В случае действительных корней U_{c1}^* и U_{c2}^* уравнения

$$a_1 U_c^{*2} + (b_1 - g_y^*) U_c^* + c_1 = 0 \quad (9)$$

при $g_y^* > 0,007345$ время заряда будет определяться выражением

$$t_3^* = t_{n1}^* + \sqrt{\frac{1}{\Delta_1}} \ln \left(\frac{U_{c1}^* - U_{ck}^*}{U_{c1}^* - 0,537} \frac{U_{c2}^* - 0,537}{U_{c2}^* - U_{ck}^*} \right), \quad (10)$$

где $\Delta_1 = (b_1 - g_y^*)^2 - 4a_1c_1$.

Очевидно, величина U_{ck}^* должна быть меньше любого из корней уравнения (9).

При $g_y^* < 0,007345$ проводимостью утечки можно пренебрегать.

На рис. 3 показаны зависимости $t^*(U_c^*)$ для различных значений g_y^* , вычисленные по (5) и (10).

Найденные выражения для $t^*(U_c^*)$ позволяют получить в соответствии с методикой, изложенной

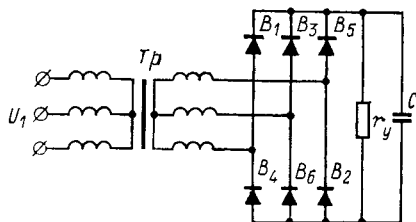


Рис. 4.

$g_y^* < 0,3205$ составит:

$$t_{н2}^* = \frac{3}{2 + 4,5g_y^*} [1,1245 - 1,5g_y^* \ln(0,4316 - 1,353g_y^*)]. \quad (13)$$

Во втором режиме работы трехфазного мостового зарядного выпрямителя среднее значение выпрямленного тока определяется выражением [Л. 7]:

$$I_d^* = \frac{3}{\pi} \left\{ \left(\frac{\sqrt{3}}{4} - \gamma \right) \sin \alpha_e + (0,25 + \sqrt{3}\gamma) \cos \alpha_e + \left[\frac{\sqrt{3}}{4} - \frac{3}{4} \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \sin(\gamma + \alpha_e) - \left[\frac{\sqrt{27}}{4} \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) + 0,25 \right] \cos(\gamma + \alpha_e) + \left[\pi \left(\frac{\pi}{3} - 2\gamma \right) - \gamma^2 - \frac{3}{4} \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)^2 \right] \frac{U_c^*}{\sqrt{3}} \right\}, \quad (14)$$

где требуется предварительно вычислить естественный угол открывания вентилей выпрямителя α_e и угол коммутации γ , находящийся в сложной зависимости от величины противо-э. д. с. (для нахождения угла γ необходимо решить трансцендентное уравнение).

Так как во втором режиме работы трехфазного мостового зарядного выпрямителя при $0,95 > U_c^* > 0,746$ зависимость $I_d^*(U_c^*)$ аналитически точно не выражается, представим на участке $0,9 \geq U_c^* > 0,746$ кривую $I_d^*(U_c^*)$, построенную (рис. 5) по (14), аппроксимирующим многочленом:

$$I_d^* = a_2 U_c^{*2} + b_2 U_c^* + c_2, \quad (15)$$

где $a_2 = 2,200$; $b_2 = -5,723$; $c_2 = 3,458$. Найденный многочлен (15) позволяет определить ток I_d^* с погрешностью, не превышающей 0,4%.

Продолжительность заряда емкостного накопителя с учетом тока утечки конденсаторов до напряжения $0,746 < U_c^* < 0,9$ может быть определена по выражению:

$$t^* = t_{н2}^* + \sqrt{\frac{3}{\Delta_2}} \ln \left(\frac{U_{c1}^* - U_{cк}^*}{U_{c1}^* - 0,746} \frac{U_{c2}^* - 0,746}{U_{c2}^* - U_{cк}^*} \right). \quad (16)$$

Здесь U_{c1}^* и U_{c2}^* — корни уравнения

$$a_2 U_c^{*2} + (b_2 - \sqrt{3}g_y^*) U_c^* + c_2 = 0, \quad (17)$$

действительные при $g_y^* \geq 0$;

$$\Delta_2 = (b_2 - \sqrt{3}g_y^*)^2 - 4a_2c_2.$$

Очевидно, величина $U_{cк}^*$ должна быть меньше любого из корней уравнения (17).

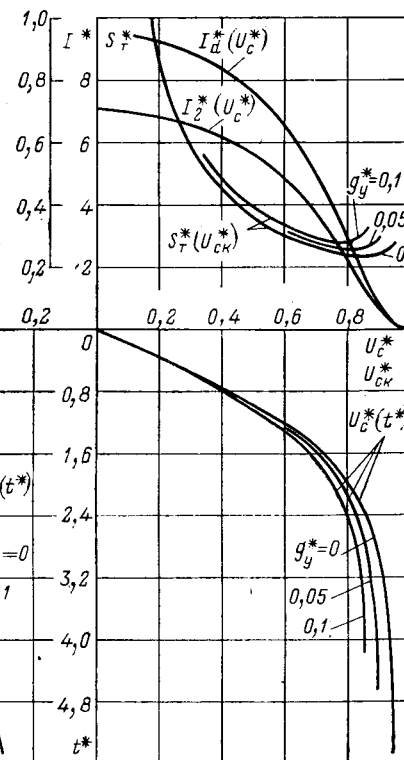


Рис. 5.

Зависимости $t^*(U_c^*)$ для различных g_y^* показаны на рис. 5. Здесь же приведены зависимости от времени t^* среднего значения выпрямленного тока $I_{dt}^*(t^*)$ и действующего значения фазного тока $I_{zt}^*(t^*)$ трансформатора за время t^* и зависимость $S_T^*(U_{cк}^*)$, позволяющие определить оптимальные параметры зарядных выпрямителей с учетом тока утечки емкостных накопителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Окунь И. З. Расчет зарядки конденсатора от сети переменного тока через индуктивное зарядное сопротивление. — «Изв. вузов. Энергетика», 1969, № 7, с. 97—101.
- Маевский О. А., Данилевич О. И., Гончаров Ю. П. Заряд конденсатора от выпрямителя с индуктивным ограничением тока. — «Изв. вузов. Электромеханика», 1969, № 11, с. 1183—1188.
- Бердинский Г. С. О параметрах зарядного устройства конденсаторной сварочной машины. — «Автоматическая сварка», Киев, 1963, № 11, с. 57—62.
- Пентегов И. В. Анализ процессов зарядки конденсаторов при наличии тока утечки. — В кн.: Устройство преобразовательной техники, вып. 1. Киев, АН УССР, 1969, с. 190—202.
- Булгаков А. А. Основы динамики управляемых вентильных систем. М., Изд. АН СССР, 1963, 220 с.
- Емельянов В. И. Трехфазная мостовая схема (основные уравнения и внешняя характеристика). — «Изв. НИИПТ. Передача энергии постоянным и переменным током», М.—Л., Госэнергоиздат, сб. № 8, 1961, с. 171—211.
- Данилевич О. И. Трехфазное выпрямительное устройство со стабилизированным током для заряда емкостных накопителей. — «Вестник Харьковского политехнического института № 45 (93). Преобразовательная техника». Изд. ХГУ, 1970, вып. 3, с. 34—40.

[5.6.1973]



Эквивалентные параметры вентильного преобразователя при линейном изменении угла регулирования

Доктор техн. наук, проф. ПОССЕ А. В.

НИИПТ

Во многих случаях для расчета переходных процессов в цепях, содержащих вентильные преобразователи, наиболее рационально пользоваться методом эквивалентного генератора, заменяя преобразователь с его сложной структурой и нелинейными элементами (вентильми) простой линейной цепью [Л. 1]. Определению параметров эквивалентного генератора посвящено несколько работ [Л. 2—6], отличающихся допущениями и способами доказательства. Все они, строго говоря, относятся к таким переходным процессам, которые протекают при постоянной величине угла регулирования преобразователя ($\alpha = \text{const}$). В настоящей работе сделан следующий шаг в определении эквивалентных параметров вентильного преобразователя: рассматриваются переходные процессы, которые протекают при линейном изменении угла регулирования, и обосновывается возможность их расчета методом эквивалентного генератора. Одновременно выясняется влияние изменения угла α на эквивалентные параметры преобразователя.

Вывод приближенного разностного уравнения. Пусть в цепи, изображенной на рис. 1, а, протекает переходный процесс, который сопровождается линейным изменением угла регулирования, так что

$$\alpha_n = \alpha_0 + n\Delta\alpha, \quad \Delta\alpha = \text{const}, \quad (1)$$

где, как это показано на рис. 2, α_0 — начальный угол регулирования, $\Delta\alpha$ — изменение угла регулирования двух смежных по порядку отпирания вентилей ($\Delta\alpha = \alpha_{n+1} - \alpha_n$), α_n — угол регулирования вентиля, который отпирается через n промежутков повторяемости после начала переходного процесса. Принимается, что переходный процесс начинается в момент отпирания одного из вентилей.

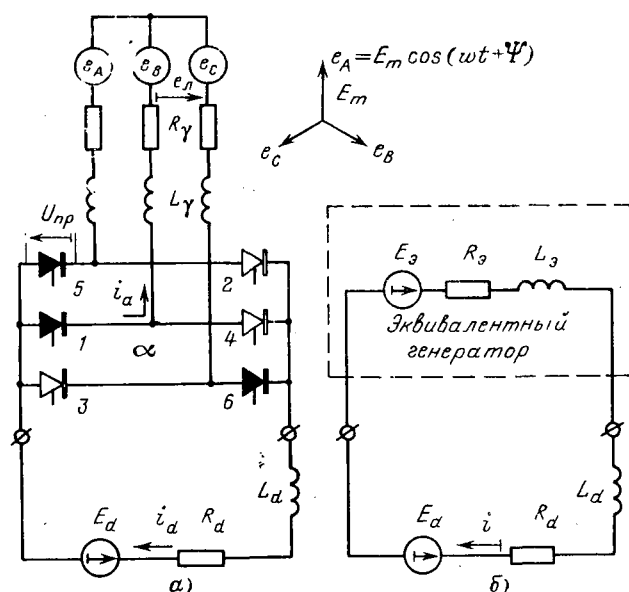


Рис. 1. Цепь, содержащая вентильный преобразователь (а) и эквивалентная ей схема (б).

При линейном изменении угла регулирования промежутки повторяемости, заключенные между моментами отпирания двух смежных вентилей, имеют постоянную длительность¹, равную

$$\Delta\theta = \pi/3 + \Delta\alpha = \text{const}. \quad (2)$$

Рассмотрим процессы в некотором промежутке повторяемости, который начинается в момент $n\Delta\theta$ и заканчивается в момент $(n+1)\Delta\theta$ (рис. 2). Сперва в интервале γ_n происходит коммутация тока и ток пропускает три вентиля, затем в другом интервале ток проходит через два вентиля. Обозначим ток вентиля, который отпирается в начале рассматриваемого промежутка повторяемости, через i_a . Проходя по контуру через этот вентиль и открытый вентиль из другой группы, можно по рис. 1, а записать:

$$\omega L_\gamma \frac{di_a}{d\theta} + R_\gamma i_a + \omega(L_d + L_\gamma) \frac{di_d}{d\theta} + (R_d + R_\gamma) i_d = e_a - E_d - 2U_{np}. \quad (3)$$

Входящая в правую часть линейная э.д.с. на стороне переменного тока согласно рис. 2 равна:

$$e_a = \sqrt{3} E_m \cos \left[\theta - \left(n \frac{\pi}{3} - \alpha_0 + \frac{\pi}{6} \right) \right].$$

Прямое падение напряжения в вентиле U_{np} принимается приближенно постоянным.

Уравнение (3) справедливо во всем промежутке повторяемости, и поэтому мы можем взять определенный интеграл от обеих его частей в пределах от $n\Delta\theta$, когда $i_a = 0$, $i_d = i_{dn}$, до $(n+1)\Delta\theta$, когда $i_a = i_d = i_{d(n+1)}$:

$$\begin{aligned} & \omega L_\gamma \int_0^{i_{d(n+1)}} di_a + R_\gamma \int_{n\Delta\theta}^{(n+1)\Delta\theta} i_a d\theta + \\ & + \omega(L_d + L_\gamma) \int_{i_{dn}}^{i_{d(n+1)}} di_d + (R_d + R_\gamma) \int_{n\Delta\theta}^{(n+1)\Delta\theta} i_d d\theta = \\ & = \sqrt{3} E_m \int_{n\Delta\theta}^{(n+1)\Delta\theta} \cos \left[\theta - \left(n \frac{\pi}{3} - \alpha_0 + \frac{\pi}{6} \right) \right] d\theta - \\ & - (E_d + 2U_{np}) \int_{n\Delta\theta}^{(n+1)\Delta\theta} d\theta. \end{aligned}$$

Определенные интегралы от токов i_a и i_d вычисляем приближенно по формуле трапеций (такой прием автор позаимствовал из неопубликованной работы В. П. Шипилло). В результате приходим к следую-

¹ Промежутки времени будут в дальнейшем измеряться как в абсолютных единицах (t), так и в угловых единицах ($\theta = \omega t$).

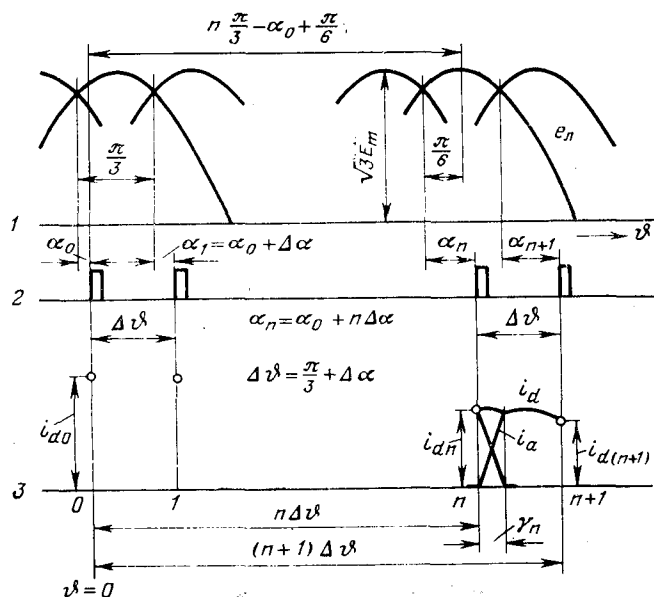


Рис. 2. К выводу разностного уравнения при линейном изменении угла регулирования.

щему приближенному разностному уравнению:

$$\begin{aligned} & \left[\omega(L_d + 2L_r) + \frac{\Delta\theta}{2}(R_d + 2R_r) \right] i_{d(n+1)} - \\ & - \left[\omega(L_d + L_r) - \frac{\Delta\theta}{2}(R_d + R_r) \right] i_{dn} \approx \\ & \approx 2\sqrt{3}E_m \sin \frac{\Delta\theta}{2} \cos \left[\left(n + \frac{1}{2} \right) \Delta\alpha + \alpha_0 \right] - \\ & - (E_d + 2U_{np}) \Delta\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

Это линейное разностное уравнение первого порядка вида $ax_{n+1} - bx_n = F(n)$. Можно получить его решение $i_{dn} = f(n)$, как это выполнено для аналогичного уравнения, например в [Л. 7]. Кроме того, оно позволяет непосредственно рассчитать последовательно все дискретные значения тока: i_{d1} по i_{d0} при $n=0$, i_{d2} по i_{d1} при $n=1$ и т. д.

Параметры эквивалентного генератора. Используем найденное приближенное разностное уравнение (4) для определения параметров эквивалентного генератора, которым можно заменить преобразователь (рис. 1) при линейном изменении угла регулирования. Основная цель отыскания эквивалентных параметров — использование их для расчета переходных процессов в более сложных случаях, когда на стороне постоянного тока преобразователя включены разветвленные цепи, содержащие кроме L_d , R_d и E_d емкости, фильтры, линию постоянного тока и т. п.

Эквивалентные параметры преобразователя в нашем случае удастся найти путем перехода от разностного уравнения к дифференциальному (такой метод был применен ранее [Л. 8] для более простого случая). Выполним следующие операции:

1. Введем в рассмотрение приращение тока на промежутке повторяемости $\Delta i = i_{d(n+1)} - i_{dn}$ и выразим токи по краям промежутка в виде

$$i_{d(n+1)} = i + \frac{\Delta i}{2}, \quad i_{dn} = i - \frac{\Delta i}{2},$$

где

$$i = \frac{1}{2} (i_{dn} + i_{d(n+1)}).$$

2. Подставим эти выражения в левую часть разностного уравнения (4) и сгруппируем отдельно члены с Δi и i .

3. Заменим в правой части уравнения дискретную величину на текущее время θ . Считая, что ток i относится к середине промежутка повторяемости, по рис. 2 находим:

$$\theta = n\Delta\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \quad \text{или} \quad n + \frac{1}{2} = \frac{\theta}{\Delta\theta}.$$

4. Разделим обе части уравнения на $\Delta\theta$ — на продолжительность промежутка повторяемости и заменим $\frac{\Delta i}{\Delta\theta}$ на $\frac{di}{d\theta}$.

В результате получаем:

$$\begin{aligned} & \omega \left(L_d + 1,5L_r + \frac{\Delta\theta}{4\omega} R_r \right) \frac{di}{d\theta} + \\ & + \left(R_d + \frac{\omega L_r}{\Delta\theta} + 1,5R_r \right) i \approx \\ & \approx \sqrt{3}E_m \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta/2} \cos \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta} \theta + \alpha_0 \right) - 2U_{np} - E_d. \end{aligned} \quad (5)$$

В этом дифференциальном уравнении под током i надо понимать гладкую составляющую выпрямленного тока i_d в реальной цепи рис. 1, а [Л. 3]. Гладкая составляющая согласно нашему выводу должна проходить примерно через дискретные значения выпрямленного тока в моменты зажигания вентилей. Уравнение (5) справедливо для всего переходного процесса, в течение которого происходит линейное изменение угла регулирования. Оно, строго говоря, является приближенным в такой же степени, как разностное уравнение (4). Приближение в основном относится к учету влияния на переходный процесс активного сопротивления R_r .

Обратимся теперь к эквивалентной схеме на рис. 1, б. Для нее имеем:

$$\omega(L_d + L_3) \frac{di}{d\theta} + (R_d + R_3) i = E_3 - E_d. \quad (6)$$

Из сравнения (5) и (6) и условия эквивалентности (одинаковые токи i в обеих схемах на рис. 1) с очевидностью находим, что эквивалентный генератор должен иметь следующие параметры:

$$E_3 = \sqrt{3}E_m \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta/2} \cos \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta} \theta + \alpha_0 \right) - 2U_{np}; \quad (7)$$

$$R_3 = \frac{\omega L_r}{\Delta\theta} + 1,5R_r; \quad (8)$$

$$L_3 = 1,5L_r + \frac{\Delta\theta}{4\omega} R_r = 1,5L_r, \quad (9)$$

так как в реальных схемах $\frac{\Delta\theta}{4\omega} R_r \ll 1,5L_r$ (обычно $R_r \leq 10^{-2}\omega L_r$, а $\Delta\theta$ около 1). Отметим также, что уточнение L_3 не имеет смысла, поскольку индуктивность внешней цепи L_d , как правило, в несколько

раз больше L_3 . Уточнение же R_3 путем учета R_1 имеет смысл во всех случаях, когда внешнее сопротивление R_d имеет небольшую величину ($R_d < R_3$). Кроме того, следует учитывать, что влияние R_1 на R_3 на порядок больше, чем на L_3 .

Ниже мы на нескольких примерах покажем, что метод эквивалентного генератора дает хорошие результаты, близкие к результатам точных расчетов на ЦВМ. Сейчас же остановимся на вопросе о влиянии изменения угла регулирования на полученные эквивалентные параметры.

Основная составляющая эквивалентной э. д. с. представляет собой э. д. с., изменяющуюся на промежутке линейного регулирования угла α по косинусоидальному закону:

$$e_3 = E_{3m} \cos(\Omega t \pm \alpha_0), \quad (10)$$

где согласно (7)

$$E_{3m} = \sqrt{3} E_m \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\frac{\Delta\theta}{2}} = \sqrt{3} E_m \frac{\sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\Delta\alpha}{2} \right)}{\frac{\pi}{6} + \frac{\Delta\alpha}{2}}, \quad (11)$$

$$\Omega = \frac{|\Delta\alpha|}{\Delta\theta} \omega = \frac{|\Delta\alpha|}{\frac{\pi}{3} + \Delta\alpha} \omega. \quad (12)$$

Знак перед α_0 в (10) соответствует знаку $\Delta\alpha$. Для выяснения влияния $\Delta\alpha$ на амплитуду E_{3m} запишем ее в виде:

$$E_{3m} = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_m K_E,$$

где

$$K_E = \frac{\pi}{3} \frac{\sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\Delta\alpha}{2} \right)}{\frac{\pi}{6} + \frac{\Delta\alpha}{2}} = \frac{2 \sin \left(30^\circ + \frac{\Delta\alpha}{2} \right)}{1 + \frac{\Delta\alpha}{60^\circ}} \quad (13)$$

График изменения K_E в функции от $\Delta\alpha$ показан на рис. 3. При $|\Delta\alpha| < 10^\circ$ коэффициент K_E близок к 1.

Основную долю в эквивалентном активном сопротивлении имеет первый член в формуле (8), величина которого зависит от индуктивности L_1 на стороне переменного тока и длительности промежутка повторяемости $\Delta\theta$. Обозначим его через R_{3L} и выясним, как R_{3L} зависит от скорости изменения угла регулирования (от $\Delta\alpha$). Очевидно, что

$$R_{3L} = \frac{\omega L_1}{\Delta\theta} = \frac{\omega L_1}{\frac{\pi}{3} + \Delta\alpha} = \frac{3}{\pi} \omega L_1 K_R,$$

где

$$K_R = \frac{\frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3} + \Delta\alpha} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta\alpha}{60^\circ}}. \quad (14)$$

Зависимость $K_R = f(\Delta\alpha)$ построена на рис. 3. При увеличении угла регулирования α (т. е. $\Delta\alpha > 0$) происходит увеличение $\Delta\theta$ и соответствующее уменьшение эквивалентного сопротивления R_{3L} . Если же регулирование ведется в сторону уменьшения угла α , то $\Delta\theta$ уменьшается и происходит достаточно заметное увеличение сопротивления R_{3L} .

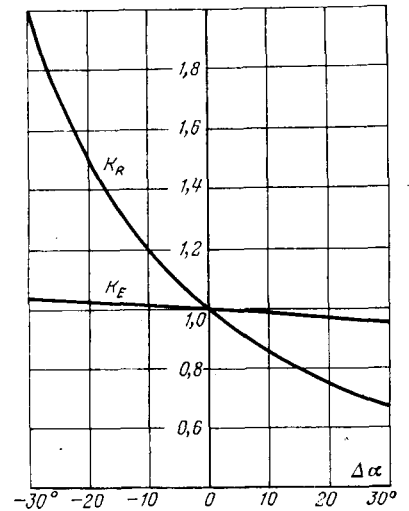


Рис. 3. Относительные величины, показывающие изменение амплитуды эквивалентной э. д. с. (K_E) и основной составляющей эквивалентного активного сопротивления (K_R).

При малой величине внешнего сопротивления R_d изменение эквивалентного активного сопротивления должно заметно сказываться на затухании свободной составляющей переходного процесса. Поскольку эквивалентная индуктивность не зависит от $\Delta\alpha$, можно утверждать, что регулирование с $\Delta\alpha > 0$ приводит к увеличению постоянной времени цепи, а при $\Delta\alpha < 0$ постоянная времени снижается.

Примеры расчета. Приведем примеры расчета переходных процессов путем замены выпрямителя эквивалентным генератором с обоснованными выше параметрами. Результаты такого расчета в каждом примере сопоставим с результатами расчета на ЦВМ методом «шаг за шагом» того же процесса в реальной схеме и тем самым получим возможность судить о точности приближенного метода эквивалентного генератора.

Во всех примерах используются относительные единицы, которые соответствуют следующим базисным величинам:

$$R_{баз} = \omega L_1, \quad U_{баз} = E_m, \quad I_{баз} = \frac{E_m}{\omega L_1}.$$

Для указания, что данная величина выражена в относительных единицах, в ее индексе добавляется звездочка.

Первый пример. Рассчитать переходный процесс в схеме рис. 1, возникающий при включении выпрямителя путем отпирания его вентилей со следующим законом изменения угла регулирования:

$$\alpha_n = 60^\circ - n \cdot 6^\circ \text{ при } 0 \leq n \leq 10 \text{ и } \alpha_n = 0 \text{ при } n \geq 10.$$

Параметры схемы: $R_{1*} = 0,1$; $R_{d*} = 3$; $\omega L_{d*} = 3$; $(E_d + 2U_{пр})_* = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}$. Прямое падение напряжения в вентильях мы

учли здесь, прибавив $2U_{пр}$ к E_d и считая, что встречная э. д. с. в цепи выпрямленного тока равна $E_d + 2U_{пр}$. При таком выносе величины $2U_{пр}$ в расчетной схеме выпрямителя остаются идеальные вентили, и в формулу (7), определяющую эквивалентную э. д. с., не входит $2U_{пр}$.

Находим параметры эквивалентного генератора. В нашем примере $\alpha_0 = 60^\circ$, $\Delta\alpha = -6^\circ$, $\Delta\theta = 60^\circ - 6^\circ = 54^\circ = 0,9425 \text{ рад}$. Согласно (10)–(12)

$$e_{3*} = E_{3m*} (\cos \Omega t - 60^\circ),$$

где

$$E_{3m*} = \sqrt{3} \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\frac{\Delta\theta}{2}} = \frac{2\sqrt{3} \sin 27^\circ}{0,9425};$$

$$\Omega = \frac{|\Delta\alpha|}{\Delta\theta} \omega = \frac{6^\circ}{54^\circ} \omega = \frac{\omega}{9}.$$

Согласно (8) и (9)

$$R_{э*} = \frac{1}{\Delta\vartheta} + 1,5R_{г*} = \frac{1}{0,9425} + 1,5 \cdot 0,1 = 1,21,$$

$$L_{э*} = 1,5L_{г*} = 1,5/\omega.$$

При расчете по эквивалентной схеме (рис. 1,б) задача сводится к нахождению тока в простой линейной цепи, в которой действуют переменная э. д. с. $E_{э*}$, постоянная э. д. с. $(E_d + 2U_{нр})_*$ и включены последовательно:

$$R_* = R_{э*} + R_{д*} = 4,21 \text{ и } L_* = L_{э*} + L_{д*} = 4,5/\omega.$$

Ток в переходном процессе при замыкании этой цепи в момент $t=0$ составляет:

$$i_* = \frac{E_{эм*}}{Z_*} \left[\cos(\Omega t - 60^\circ - \varphi) - \cos(60^\circ + \varphi) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right] - \frac{(E_d + 2U_{нр})_*}{R_*} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \quad (15)$$

где

$$Z_* = \sqrt{R_*^2 + (\Omega L_*)^2} = \sqrt{4,21^2 + \left(\frac{\omega}{9} \frac{4,5}{\omega}\right)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\Omega L_*}{R_*} = \arctg \frac{4,5}{9 \cdot 4,21} = 6^\circ 48';$$

$$T = \frac{L_*}{R_*} = \frac{4,5}{\omega \cdot 4,21} = 3,40 \cdot 10^{-3} \text{ сек} = 3,40 \text{ мсек}.$$

Формула (15) справедлива в промежутке линейного изменения угла регулирования от $\alpha_0 = 60^\circ$ до $\alpha_{10} = 0$, т. е. от $t=0$ до $t_1 = 10 \frac{\Delta\vartheta}{\omega} = 30 \text{ мсек}$. Кривая тока, рассчитанная в этом промежутке по (15), построена на рис. 4. Свободные составляющие тока затухают практически за первые 15 мсек, в дальнейшем изменение тока определяется в основном ростом вынужденной составляющей.

После t_1 изменение тока рассчитано также по эквивалентной схеме с учетом того, что теперь $\alpha_n = 0 = \text{const}$. Параметры эквивалентного генератора приобретают такие значения:

$$E_{э*} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}, \quad R_{э*} = \frac{3}{\pi} + 1,5R_{г*} = 1,105, \quad L_{э*} = \frac{1,5}{\omega}.$$

Поэтому при $t > t_1$

$$i_* = i_{1*} + (I_* - i_{1*}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_1}{T_1}\right) \right],$$

где i_{1*} — ток в момент t_1 ; I_* — установившийся ток; T_1 — постоянная времени цепи.

На рис. 4 кроме кривой тока i_* , рассчитанного по эквивалентной схеме, нанесены кружками точки, показывающие изменение выпрямленного тока i_{d*} в реальной схеме рис. 1,а. Значения тока i_{d*} рассчитаны на ЦВМ «шаг за шагом» по уравнениям, выведенным без каких-либо допущений.

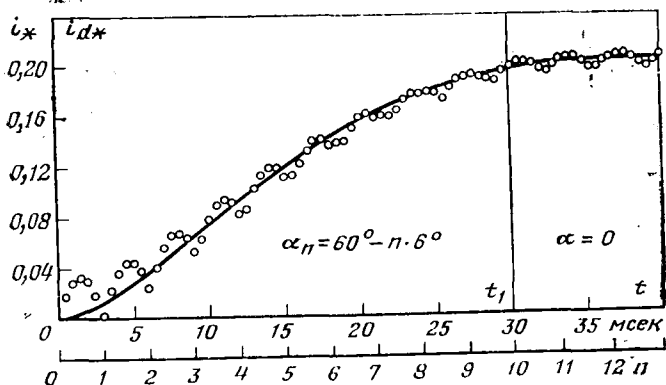


Рис. 4. Переходный процесс при включении выпрямителя с линейным изменением угла регулирования в промежутке $0 \div t_1$.

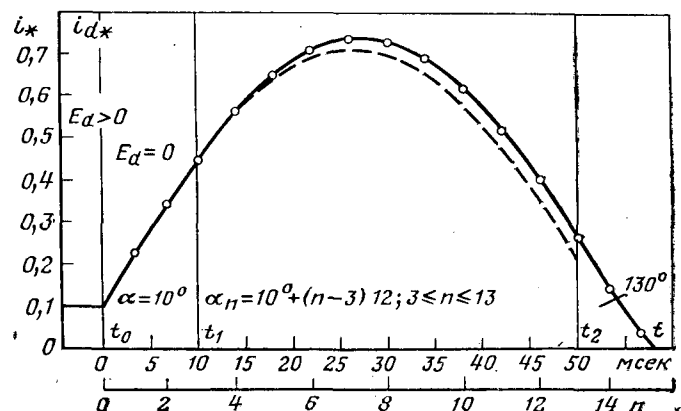


Рис. 5. Переходный процесс при закорачивании источника встречной э. д. с. и линейном изменении угла регулирования в промежутке $t_1 \div t_2$.

Как видно, в рассмотренном примере ток i в эквивалентной схеме хорошо отражает основную (гладкую) составляющую выпрямленного тока i_d .

Второй пример. Результат расчета переходного процесса показан на рис. 5. До момента t_0 выпрямитель (рис. 1,а) работает в установившемся режиме с углом $\alpha = 10^\circ$. В момент t_0 возникает короткое замыкание: закорачивается источник встречной э. д. с. E_d . До момента t_1 угол α не изменяется, а затем начинается его линейное увеличение, которое продолжается в течение 10 промежутков повторяемости с $\Delta\alpha = 12^\circ$. В момент t_2 угол α достигает 130° и дальше остается неизменным. Вскоре после t_2 ток падает до нуля, переходный процесс заканчивается.

Параметры схемы: $R_{г*} = R_{д*} = 0,1$; $\omega L_{д*} = 10$; $U_{нр} = 0$ при $t \geq t_0$ э. д. с. $E_d = 0$. Начальное условие: $i_{d*} = 0,1$.

Параметры эквивалентного генератора, рассчитанные по (7)–(9), приведены в таблице.

Результат расчета тока i_* в эквивалентной схеме рис. 1,б при указанных параметрах показан на рис. 5 в виде сплошной кривой. Кружками показаны значения выпрямленного тока i_{d*} в схеме рис. 1,а, рассчитанные на ЦВМ. Погрешность метода эквивалентного генератора в данном примере лежит в пределах $0,2$ – 2% .

Интересно выяснить, какое уточнение при расчете переходного процесса дает найденная нами зависимость $E_{эм}$ и $R_{э}$ от $\Delta\alpha$. Для этого ток i_* в промежутке $t_1 \div t_2$ был дополнительно рассчитан в предположении, что изменение угла регулирования α приводит только к косинусоидальному изменению эквивалентной э. д. с. (учитывается только величиной $\cos \alpha$).

$$\text{В этом случае } E_{эм*} = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} = 1,65 \text{ и } R_{э*} = \frac{3}{\pi} + 1,5R_{г*}$$

(в нашем примере $R_{э*} = 1,105$). Результат расчета тока i_* при таких параметрах эквивалентного генератора показан на рис. 5 пунктирной кривой. Как видно, пренебрежение зависимостью $E_{эм}$ и $R_{э}$ от $\Delta\alpha$ в этом примере дает заметную погрешность, достигающую в конце промежутка 19% (погрешность на порядок выше, чем при правильном определении параметров эквивалентного генератора).

Третий пример. В этом примере мы покажем, что метод эквивалентного генератора дает хорошие результаты и в тех случаях, когда цепь выпрямленного тока отличается от пока-

Промежуток	$\alpha_0, ^\circ$	$\Delta\alpha, ^\circ$	$E_{э*}$	$R_{э*}$	$\omega L_{э*}$
$t_0 \div t_1$	10	0	$1,65 \cos 10^\circ$	1,105	1,5
$t_1 \div t_2$	10	12	$1,62 \cos \left[\frac{\omega}{6} (t-t_1) + 10^\circ \right]$	0,946	1,5
$t > t_2$	130	0	$1,65 \cos 130^\circ$	1,105	1,5

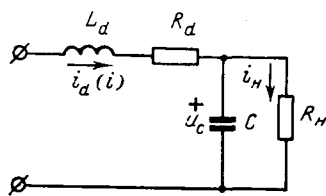


Рис. 6. Цепь выпрямленного тока.

званной на рис. 1. Пусть к выходным зажимам выпрямителя и соответствующего ему эквивалентного генератора (рис. 1) присоединена цепь, изображенная на рис. 6. Рассчитаем переходный процесс при включении выпрямителя со следующим изменением угла регулирования:

$$\alpha_n = 70^\circ - n \cdot 6^\circ \text{ при } 0 \leq n \leq 10; \alpha_n = 10^\circ \text{ при } n \geq 10.$$

Параметры схемы:

$R_{\gamma*} = R_{d*} = 0,1$; $\omega L_{d*} = 10$; $U_{np} = 0$; $1/(\omega C)_* = 7,5$; $R_{n*} = 30$. Начальные условия — нулевые. Параметры эквивалентного генератора на промежутке линейного изменения угла α :

$$e_{*} = 1,67 \cos\left(\frac{\omega}{9}t - 70^\circ\right); R_{*} = 1,21; L_{*} = \frac{1,5}{\omega}.$$

Используя эквивалентную схему, решаем обычную для линейных цепей задачу и находим:

$$i_* = I_{1*} \sin\left(\frac{\omega}{9}t + 40^\circ 30'\right) + I_{2*} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \sin(\beta t - 39^\circ 29');$$

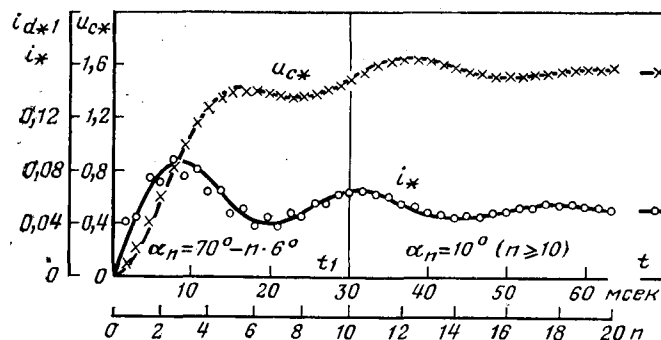
$$u_{c*} = U_{1*} \sin\left(\frac{\omega}{9}t + 16^\circ 32'\right) - U_{2*} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \cos(\beta t - 34^\circ 39'),$$

где $\beta = 258,8$ рад/сек; $T = 17,5$ мсек; $I_{1*} = 0,0593$; $I_{2*} = 0,0606$; $U_{1*} = 1,62$; $U_{2*} = 0,562$.

Результаты расчета по этим уравнениям приведены на рис. 7 в виде кривых в промежутке $0 \div t_1$. При $t > t_1$ значения i_* и u_{c*} рассчитаны по другим уравнениям, полученным исходя из той же схемы, но с параметрами эквивалентного генератора, которые соответствуют работе выпрямителя с постоянным углом α , равным 10° . Для сравнения на рис. 7 показаны кружками и крестиками точки того же переходного процесса, рассчитанного на ЦВМ «шаг за шагом» по уравнениям, выведенным для реальной схемы (без замены выпрямителя эквивалентным генератором). Как видно, расчет по эквивалентной схеме привел к хорошим результатам; погрешность наибольшего значения напряжения конденсатора на промежутке $0 \div t_1$ около 2%, а максимального напряжения (при $t > t_1$) меньше 1%.

Выводы. В настоящей статье вопрос об эквивалентных параметрах и расчете переходных процессов при линейном изменении угла регулирования рассмотрен применительно к одному преобразователю (рис. 1,а). Аналогичные результаты получаются и для других преобразовательных схем, совершенно так же, как и в случае исследованных ранее переходных процессов при $\alpha = \text{const}$ [Л. 4]. Поэтому можно сформулировать общие выводы, относящиеся к различным преобразовательным схемам. Эти выводы справедливы для переходных процессов, которые протекают без нарушения коммутации вентилей в области непрерывного выпрямленного тока и с углами коммутации, не превосходящими длительности промежутков повторяемости [Л. 9].

1. Эквивалентные параметры преобразователя находятся исходя из схемы, в которой на стороне переменного тока учитываются индуктивные и активные сопротивления, а в цепь выпрямленного тока включены последовательно L_d , R_d и E_d . Для этой схемы выводится приближенное разностное уравнение, учитывающее линейное изменение угла регулирования α (приближение связано с нахождением

Рис. 7. Переходный процесс при включении выпрямителя на цепь, показанную на рис. 6, и линейном изменении угла регулирования в промежутке $0 \div t_1$.

определенных интегралов от членов с активными сопротивлениями).

2. Эквивалентные параметры преобразователя получаются в результате перехода от приближенного разностного уравнения к соответствующему дифференциальному.

3. При линейном изменении угла α от $\Delta\alpha$ зависит частота и амплитуда эквивалентной э. д. с. и эквивалентное активное сопротивление R_a , индуктивность L_a остается такой же, как при $\alpha = \text{const}$. Основная составляющая R_a , зависящая от индуктивности на стороне переменного тока, обратно пропорциональна длительности промежутка повторяемости.

4. Применение метода эквивалентного генератора для расчета переходных процессов в цепях с преобразователями при линейном изменении угла регулирования и разных структурах цепи выпрямленного тока, сводя задачу к линейной, дает результаты, вполне приемлемые по своей точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поссе А. В., Севрюгов А. В. Методы расчета схем выпрямителей и инверторов большой мощности.— «Изв. вузов. Электромеханика», 1973, № 3, с. 259—273.
2. Рейдер А. М. Анализ устойчивости системы регулирования передачи постоянного тока Кашира — Москва.— «Изв. НИИПТ», сб. 1, 1957, с. 127—148.
3. Булгаков А. А. Основы динамики управляемых вентильных систем. М., «Наука», 1963. 220 с.
4. Поссе А. В. Обоснование замены выпрямителя эквивалентным генератором для расчета переходных процессов.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 4, с. 19—34.
5. Приближенные расчетные формулы и эквивалентная схема вентильных выпрямителей.— В кн.: Теоретическая электротехника. Изд. Львовского университета, 1972, с. 80—87. Авт.: Вейнгер А. М., Коробицын Ю. Я., Кочнев В. Н. и др.
6. Мерабишвили П. Ф., Случанко Е. И. Исследование установившихся и переходных процессов в трехфазных мостовых выпрямителях с помощью коммутационных функций.— «Электричество», 1973, № 4, с. 21—26.
7. Поссе А. В. Применение метода разностных уравнений для расчета переходных процессов в преобразователях.— «Труды НИИПТ», сб. 18, 1972, с. 3—28.
8. Набутовский И. Б. Исследование процессов в питающемся от синхронной машины выпрямителе с применением разностных уравнений.— «Труды ЛПИ им. М. И. Калинина», 1968, № 293, с. 95—101.
9. Нейман Л. Р. Обобщенный метод анализа переходных и установившихся процессов в цепях с преобразователями с учетом активных сопротивлений.— «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1972, № 2, с. 3—15.

[1.10.1973]

О границах диапазона возможных потерь в безындукционном электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения

ЛЕРНЕР М. М.

Киев

Введение. Методика расчета потерь в конденсаторах при несинусоидальных напряжениях в достаточной мере еще не разработана. Необходимость ее дальнейшей разработки вызвана прежде всего расширяющимся применением конденсаторов в схемах тиристорных преобразователей.

Потери конденсатора при несинусоидальном напряжении определяются формой напряжения и частотными характеристиками конденсатора. Если частотные характеристики конденсатора неизвестны, то необходимо иметь возможность определения границ диапазона потерь в нем.

Пусть на конденсатор воздействует несинусоидальное напряжение $u(t)$ с таким же действующим значением U и такой же частотой Ω , что у синусоидального напряжения. Согласно [Л. 1] мощность потерь при несинусоидальном воздействии можно рассчитать по выражению:

$$P_{\text{несин}} = 0,5 \sum_{i=1}^{\infty} \Delta_n^2 n \Omega C_{pn} \operatorname{tg} \delta_n, \quad (1)$$

где Δ_n — амплитуда n -й гармоники разложения несинусоидального напряжения в ряд Фурье; C_{pn} — емкость конденсатора, измеренная по параллельной схеме замещения на частоте $n\Omega$; $\operatorname{tg} \delta_n$ — тангенс угла потерь конденсатора на частоте $n\Omega$.

Из (1) видно, что для расчета $P_{\text{несин}}$ нужно располагать частотной зависимостью емкости и $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора. Пусть частотные зависимости конденсатора неизвестны. Можно ли назвать нижнюю $P_{\min}$ и верхнюю $P_{\max}$ границы, за пределы которых значение $P_{\text{несин}}$ не выходит при любых частотных зависимостях емкости и $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора?

В [Л. 1—4] указывались границы возможных потерь для безындукционных конденсаторов. Практически безындукционными можно считать все конденсаторы, резонансные частоты которых на много превосходят рабочую частоту Ω действующего на них напряжения.

Без доказательства отмечалось, что минимальная мощность потерь равна потерям при синусоидальном напряжении $P_{\min} = P_{\text{син}}$ и наблюдается у конденсатора, частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ которого обратно пропорциональна частоте ($\operatorname{tg} \delta_n = \operatorname{tg} \delta_{\Omega}/n$ — см. рис. 1), а емкость C_{pn} конденсатора, измеренная по параллельной схеме замещения, не зависит от частоты ($C_{pn} = C_{p\Omega}$). Схемы замещения конденсатора с такими частотными зависимостями названы p -схемами замещения. Простейшая p -схема замещения двухэлементная; она состоит из емкости $C_{p\Omega}$, параллельно которой подключено сопротивление $R_{p\Omega}$.

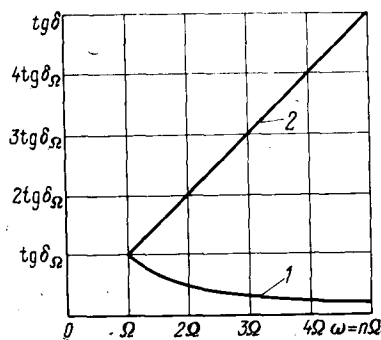


Рис. 1. Частотные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ безындукционных конденсаторов с p -схемой (кривая 1) и s -схемой (кривая 2) замещения.

Мощность потерь в такой схеме замещения обозначена через P_p . Таким образом утверждалось, что $P_{\min} = P_{\text{син}} = P_p$.

Максимальная мощность при несинусоидальном воздействии превосходит $P_{\min}$ в $\eta_{\max}$ раз и наблюдается у конденсатора, частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ которого прямо пропорциональна частоте ($\operatorname{tg} \delta_n = n \operatorname{tg} \delta_{\Omega}$ — см. рис. 1), а емкость C_{sn} конденсатора, измеренная по последовательной схеме замещения, не зависит от частоты [$C_{sn} = C_{s\Omega} = C_{p\Omega}(1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega})$].

Схемы замещения с такими частотными зависимостями названы s -схемами замещения. Простейшая s -схема замещения двухэлементная; она состоит из емкости $C_{s\Omega}$, последовательно с которой включено сопротивление r_s . Мощность потерь в такой схеме замещения обозначена через P_s . Таким образом, утверждалось, что $P_{\max} = P_s = \eta_{\max} P_{\min}$.

Коэффициент $\eta_{\max}$ назван максимальным поправочным коэффициентом. Он характеризует ширину возможного диапазона потерь при заданной форме напряжения $u(t)$ и позволяет оценить степень опасности перегрева при несинусоидальном напряжении по сравнению с синусоидальным напряжением с тем же действующим значением.

Настоящая работа посвящена строгому доказательству того, что нижняя и верхняя границы диапазона возможных потерь безындукционного конденсатора равны потерям в p и s -схемах замещения соответственно. Для доказательства произведем классификацию возможных схем замещения безындукционных конденсаторов.

Классификация схем замещения безындукционных конденсаторов. Если конденсатор безындукционный, его схема замещения содержит только емкости и активные сопротивления. При этом на входе схемы замещения может быть емкость или активное сопротивление, подключенное последовательно или параллельно входным клеммам. В зависимости от способа подключения и вида элемента можно все схемы замещения подразделить на четыре класса (рис. 2). При последовательном включении частотно-независимого элемента оставшаяся часть схемы на каждой частоте эквивалентно заменяется параллельно включенными емкостью и сопротивлением. При параллельном включении частотно-независимого элемента осталь-

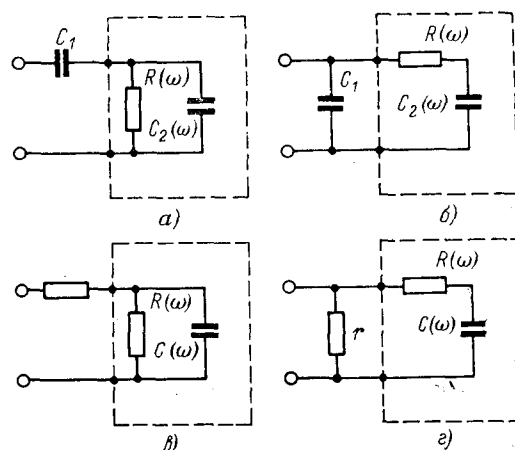


Рис. 2. Классификация трехэлементных схем замещения безындукционных конденсаторов.

ная часть схемы на каждой частоте эквивалентно заменяется последовательно включенными емкостью и сопротивлением.

Таким образом, любая сколь угодно сложная схема замещения безындукционного конденсатора может быть представлена одной из четырех трехэлементных схем замещения, у которых два из трех элементов являются частотно-зависимыми. Вариацией параметров элементов схем замещения, приведенных на рис. 2, можно перевести их в простейшую p - или s -схему замещения.

Будем изменять параметры любой из трехэлементных схем замещения конденсатора так, чтобы выполнялись следующие два условия.

Первое условие — входная емкость $C_{p\Omega}$ схемы, измеренная на частоте Ω по параллельной схеме замещения, не изменяется:

$$C_{p\Omega} = \text{const.} \quad (2)$$

Второе условие — тангенс угла потерь $\text{tg } \delta_\Omega$ схемы, измеренный на частоте Ω , не изменяется:

$$\text{tg } \delta_\Omega = \text{const.} \quad (3)$$

Если $R_{p\Omega}$ — эквивалентное параллельное сопротивление схемы на частоте Ω , то из условий (2) и (3) вытекает третье зависимое от них условие:

$$R_{p\Omega} = \frac{1}{\Omega C_{p\Omega} \text{tg } \delta_\Omega} = \text{const.} \quad (4)$$

При таком варьировании получается множество схем с одинаковыми входными параметрами на частоте Ω . При этом два элемента в каждой схеме зависят от частоты. Схемы отличаются частотными характеристиками емкости и $\text{tg } \delta_n$.

Преобразуем выражение (1), учитывая, что $\text{tg } \delta_n = 1/(n\Omega C_{pn} R_{pn})$, где R_{pn} — эквивалентное параллельное сопротивление схемы, измеренное на частоте $n\Omega$:

$$P_{\text{несия}} = 0,5 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta_n^2}{R_{pn}}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что для оценки значения потерь в схеме необходимо вычислить R_{pn} . Если окажется, что при изменении параметров схемы в направлении, приближающем ее к s -схеме замещения, значения R_{pn} монотонно уменьшаются, то потери растут, достигая максимального значения при s -схеме замещения. Если помимо того будет доказано, что в этом случае сопротивление R_{pn} будет больше значения, соответствующего p -схеме замещения, то мощность потерь при p -схеме будет наименьшей.

Исследование схемы на рис. 2,а. Входная проводимость схемы равна:

$$Y(jn\Omega) = \frac{1}{\frac{1}{R(\omega)} + jn\Omega C_2(\omega)} + \frac{1}{jn\Omega C_1}.$$

Из этого выражения для R_{pn} , C_{pn} и $\text{tg } \delta_n$ соответственно имеем:

$$R_{pn} = R(\omega) \left[\left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right)^2 + \frac{1}{n^2 \Omega^2 C_1^2 R^2(\omega)} \right]; \quad (6)$$

$$C_{pn} = \frac{C_2(\omega) \left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right) + \frac{1}{n^2 \Omega^2 C_1^2 R^2(\omega)}}{\left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right)^2 + \frac{1}{n^2 \Omega^2 C_1^2 R^2(\omega)}}; \quad (7)$$

$$\text{tg } \delta_n = \frac{1}{n\Omega R(\omega) C_2(\omega) \left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right) + \frac{1}{n\Omega C_1 R^2(\omega)}}. \quad (8)$$

При $n = 1$ получим:

$$R_{p\Omega} = R_{p1} = R_{p\Omega} = \frac{1}{\Omega C_{p\Omega} \text{tg } \delta_\Omega};$$

$$C_{p\Omega} = C_{p1} = C_{p\Omega};$$

$$\text{tg } \delta_n = \text{tg } \delta_1 = \text{tg } \delta_\Omega = \frac{1}{\Omega C_{p\Omega} R_{p\Omega}}.$$

С другой стороны, согласно условиям (2) — (4) значения $C_{p\Omega}$, $\text{tg } \delta_\Omega$ и $R_{p\Omega}$ при любых параметрах частотно-зависимых элементов $R(\omega)$ и $C_2(\omega)$ неизменны. Поэтому из (2) — (4) вытекают следующие условия, накладываемые на значения $R(\omega)$ и $C_2(\omega)$:

$$R_{p\Omega} = R(\omega) \left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right)^2 + \frac{1}{R(\omega) \Omega^2 C_1^2}; \quad (9)$$

$$C_{p\Omega} = \frac{C_2(\omega) \left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right) + \frac{1}{\Omega^2 C_1 R^2(\omega)}}{\left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right)^2 + \frac{1}{\Omega^2 C_1^2 R^2(\omega)}}; \quad (10)$$

$$\text{tg } \delta_\Omega = \frac{1}{\Omega R(\omega) C_2(\omega) \left(1 + \frac{C_2(\omega)}{C_1} \right) + \frac{1}{\Omega C_1 R(\omega)}}. \quad (11)$$

Заметим, что только каждые два из трех условий (9) — (11) являются независимыми.

Исходя из этих условий, установим возможные диапазоны изменения параметров элементов схемы. Перемножив выражения (9) и (10) и решив полученное уравнение относительно C_1 , имеем:

$$C_1 = \frac{C_2^2(\omega) + \frac{1}{\Omega^2 R^2(\omega)}}{\frac{C_{p\Omega} R_{p\Omega}}{R(\omega)} - C_2(\omega)}. \quad (12)$$

Поскольку C_1 не может быть отрицательной величиной, знаменатель дроби в (12) должен быть больше нуля. Отсюда следует возможный диапазон изменения значений $C_2(\omega)$:

$$0 \leq C_2(\omega) \leq C_{p\Omega} R_{p\Omega} / R(\omega).$$

Наименьшему значению $C_2(\omega)$ соответствует s -схема замещения (см. схему на рис. 2,а при $C_2(\omega) = 0$). Из выражений (12), (11) и (9) вычисляются значения других параметров схемы для этого случая:

$$C_1 = C_{p\Omega} (1 + \text{tg}^2 \delta_\Omega);$$

$$R(\omega) = R_{p\Omega} \frac{\text{tg}^2 \delta_\Omega}{1 + \text{tg}^2 \delta_\Omega}.$$

Наибольшему значению $C_2(\omega)$ соответствует p -схема замещения, так как при этом $C_1 = \infty$ [см. (12)]. Тогда из (9) и (10) следует, что $R(\omega) = R_{p\Omega}$ и $C_2(\omega) = C_{p\Omega}$.

Итак, возможные диапазоны изменения значений параметров элементов схемы таковы:

$$\left. \begin{array}{l} s \text{ схема} \\ \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq C_2(\omega) \leq C_{p\Omega}; \\ C_{p\Omega} (1 + \text{tg}^2 \delta_\Omega) \leq C_1 \leq \infty; \\ R_{p\Omega} \frac{\text{tg}^2 \delta_\Omega}{1 + \text{tg}^2 \delta_\Omega} \leq R(\omega) \leq R_{p\Omega}. \end{array} \right. \\ p \text{ схема} \end{array} \right\}$$

Проанализируем закон изменения эквивалентного параллельного сопротивления R_{pn} при изменении параметров элементов схемы. Из (6) и (9) следует:

$$R_{pn} = R_{p\Omega} - \frac{1}{\Omega^2 C_1^2 R(\omega)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right). \quad (13)$$

Отсюда видно, что для каждого фиксированного n при значениях параметров элементов, соответствующих p -схеме,

сопротивление R_{pn} принимает максимальное значение, равное $R_{p\Omega}$:

$$R_{pn \max} = R_{p\Omega}. \quad (14)$$

Этому значению R_{pn} будет соответствовать минимальная мощность:

$$P_{\min} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta_n^2}{2R_{p\Omega}} = \frac{1}{2R_{p\Omega}} \sum_{n=1}^{\infty} \Delta_n^2.$$

Пользуясь равенством Парсеваля $\left(\sum_{n=1}^{\infty} \Delta_n^2 = 2U^2 \right.$, где U — действующее значение напряжения), получаем:

$$P_{\min} = \frac{U^2}{R_{p\Omega}}.$$

Из этого выражения с учетом (4), имеем:

$$P_{\min} = U^2 \Omega C_{p\Omega} \operatorname{tg} \delta_{\Omega}.$$

т. е. нижняя граница потерь равна потерям при синусоидальном напряжении с той же частотой и тем же действующим значением, что и несинусоидальное.

По мере изменения значений параметров элементов схемы в направлении s -схемы замещения R_{pn} монотонно уменьшается при фиксированном значении n .

Подставляя в (13) значения параметров для s -схемы замещения, получаем:

$$R_{pn \min} = R_{p\Omega} \frac{\operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega} + \frac{1}{n^2}}{\operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega} + 1}. \quad (15)$$

Из (15) следует, что по мере увеличения n значение $R_{pn \min}$ уменьшается от $R_{p\Omega}$ при $n=1$ до $R_{p\Omega} \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega} / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega})$ при $n = \infty$. Минимальное значение R_{pn} определяет максимально возможную мощность $P_{\max}$ потерь в конденсаторе.

Таким образом, для любых сколь угодно сложных RC -схем, сводящихся к схеме на рис. 2,а и удовлетворяющих условиям (2)–(4), мощность потерь при воздействии несинусоидального напряжения располагается между мощностью потерь, соответствующей p -схеме замещения, и мощностью потерь, соответствующей s -схеме.

В заключение убедимся, что частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ любой сколь угодно сложной схемы замещения располагается между частотными зависимостями $\operatorname{tg} \delta$ p - и s -схем замещения. Из (8) и (11) следует:

$$\operatorname{tg} \delta_n = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\Omega}}{n} \frac{1}{1 - \frac{\operatorname{tg} \delta_{\Omega}}{\Omega C_1 R(\omega)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (16)$$

Второй множитель в (16) представляет собой неправильную дробь, поскольку знаменатель дроби не может быть отрицательным и вычитаемое в знаменателе меньше 1. Таким образом $\operatorname{tg} \delta_n$ всегда больше $\operatorname{tg} \delta_{\Omega}/n$, кроме случая, когда

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_{\Omega}}{\Omega C_1 R(\omega)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) = 0,$$

что возможно при $n=1$ или $C_1 = \infty$ (т. е. имеет место p -схема замещения).

Максимум дроби будет тогда, когда C_1 и $R(\omega)$ минимальные (т. е. при s -схеме замещения). Тогда $\operatorname{tg} \delta_{\Omega} = \Omega C_1 R(\omega)$ и $\operatorname{tg} \delta_n = n \operatorname{tg} \delta_{\Omega}$, что соответствует частотной зависимости s -схемы замещения.

Исследование схемы на рис. 2,б. Входная проводимость схемы равна:

$$Y(j\Omega) = \frac{1}{R(\omega) + \frac{1}{jn\Omega C_2(\omega)}} + jn\Omega C_1.$$

Из этого выражения для R_{pn} и C_{pn} соответственно имеем:

$$\left. \begin{aligned} R_{pn} &= R(\omega) + \frac{1}{n^2 \Omega^2 C_2^2(\omega) R(\omega)}; \\ C_{pn} &= C_1 + \frac{C_2(\omega)}{1 + n^2 \Omega^2 C_2^2(\omega) R^2(\omega)}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Учитывая значения R_{pn} и C_{pn} при $n=1$, а также условия (2)–(4), накладываемые на значения параметров элементов схемы, получаем:

$$C_1 = C_{p\Omega} - \frac{C_2(\omega)}{1 + \Omega^2 C_2^2(\omega) R^2(\omega)}.$$

Это выражение позволяет установить следующие диапазоны изменения параметров элементов схемы:

$$s \parallel \left\{ \begin{aligned} 0 &\leq C_1 \leq C_{p\Omega}; \\ C_{p\Omega} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}) &\leq C_2(\omega) \leq \infty; \\ R_{p\Omega} \frac{\operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}} &\leq R(\omega) \leq R_{p\Omega}. \end{aligned} \right\} p \parallel \text{схема } p$$

Из (17) с учетом значения R_{pn} при $n=1$ имеем:

$$R_{pn} = R_{p\Omega} - \frac{1}{R(\omega) \Omega^2 C_2^2(\omega)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

Из этого выражения при фиксированных n можно получить выражения для $R_{pn \min}$ и $R_{pn \max}$, совпадающие с (14) и (15).

Исследованные схемы на рис. 2,в. Входная проводимость схемы

$$Y(j\Omega) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{R(\omega)} + jn\Omega C(\omega)} + r},$$

откуда найдем выражения для R_{pn} и C_{pn} :

$$\left. \begin{aligned} R_{pn} &= \frac{\left(1 + \frac{r}{R(\omega)} \right)^2 \frac{1}{n^2} + r^2 \Omega^2 C^2(\omega)}{\frac{1}{R(\omega) n^2} \left(1 + \frac{r}{R(\omega)} \right) + r \Omega^2 C^2(\omega)}; \\ C_{pn} &= \frac{C(\omega)}{\left(1 + \frac{r}{R(\omega)} \right)^2 + n^2 \Omega^2 C^2(\omega) r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

С учетом значений R_{pn} и C_{pn} при $n=1$ и условий (2)–(4) можно получить выражение:

$$C(\omega) = C_{p\Omega} \frac{1 + \frac{r}{R(\omega)}}{1 - \frac{r}{R_{p\Omega}}}. \quad (19)$$

Из (19) найдем следующие диапазоны изменения параметров элементов схемы:

$$s \parallel \left\{ \begin{aligned} R_{p\Omega} \frac{\operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}} &\geq r \geq 0; \\ \infty &\geq R(\omega) \geq R_{p\Omega}; \\ C_{p\Omega} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}) &\geq C(\omega) \geq C_{p\Omega}. \end{aligned} \right\} p \parallel \text{схема } p$$

С учетом значения R_{pn} при $n=1$ из (18) получим:

$$R_{pn} = R_{p\Omega} \frac{\Omega C(\omega) \operatorname{tg} \delta_{\Omega} - \frac{1}{R_{p\Omega}} \left(1 + \frac{r}{R(\omega)} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)}{\Omega C(\omega) \operatorname{tg} \delta_{\Omega} - \frac{1}{R(\omega)} \left(1 + \frac{r}{R(\omega)} \right) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (20)$$

Из (20) при фиксированных n можно получить выражение для $R_{pn \min}$ и $R_{pn \max}$, совпадающие с (14) и (15).

Исследование схемы на рис. 2,г. Входная проводимость схемы равна:

$$Y(jn\Omega) = \frac{1}{r(\omega) + \frac{1}{jn\Omega C(\omega)}}$$

Отсюда следуют выражения для R_{pn} и C_{pn} :

$$\left. \begin{aligned} R_{pn} &= \frac{R + r^2(\omega) R n^2 \Omega^2 C^2(\omega)}{1 + [r(\omega) + R] n^2 \Omega^2 C^2(\omega) r(\omega)}; \\ C_{pn} &= \frac{C(\omega)}{1 + n^2 r^2(\omega) C^2(\omega) \Omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

С учетом значений R_{pn} и C_{pn} при $n=1$, а также условий (2)—(4) имеем:

$$C = C_{p\Omega} \frac{1}{1 - r \left(\frac{1}{R_{p\Omega}} - \frac{1}{R} \right)}$$

Последнее выражение позволяет установить следующие диапазоны изменения значений параметров элементов схемы:

$$\left. \begin{aligned} C_{p\Omega} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}) &\geq C(\omega) \geq C_{p\Omega}; \\ \infty &\geq R \geq R_{p\Omega}; \\ R_{p\Omega} \frac{\operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{\Omega}} &\geq r(\omega) \geq 0. \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{схема} \\ \text{схема} \end{array}$$

Из (21) и значения R_{pn} при $n=1$ получаем:

$$R_{pn} = R_{p\Omega} \frac{\frac{C(\omega)}{C_{p\Omega}} - \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}{\frac{C(\omega)}{C_{p\Omega}} - \frac{R_{p\Omega}}{R} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}$$

При фиксированных n выражения для $R_{pn \min}$ и $R_{pn \max}$ будут совпадать с (14) и (15).

Таким образом, нижняя и верхняя границы диапазона возможных потерь безындукционного конденсатора равны поте-

рям в p - и s -схемах замещения соответственно, а частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ любого безындукционного конденсатора располагается в области, ограниченной частотными зависимостями $\operatorname{tg} \delta$ p - и s -схем замещения — предельных для множества возможных RC -схем замещения конденсатора. Но может ли частотная зависимость выходить за пределы этой области, т. е. изменяться круче, чем $\operatorname{tg} \delta = n \operatorname{tg} \delta_{\Omega}$, или медленнее, чем $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{\Omega} / n$? Может ли частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора содержать несколько максимумов и минимумов? Опыт показывает, что такие зависимости для некоторых конденсаторов в определенном диапазоне частот возможны, и тогда конденсатор нельзя рассматривать как безындукционный и строить его эквивалентную схему только из элементов R и C . Эквивалентная схема конденсатора в этом случае должна содержать резонансные контуры, т. е. быть RCL -схемой. Такие схемы заслуживают особого рассмотрения.

В заключение отметим, что примененный здесь феноменологический метод оценки потерь не позволяет однозначно судить о структуре потерь в конденсаторе, т. е. точно установить, какая часть потерь относится к обкладкам, а какая к диэлектрику конденсатора. Это связано с тем, что одну и ту же частотную зависимость $\operatorname{tg} \delta$ может иметь несколько различных схем замещения с различным числом и топологическим расположением активных сопротивлений, потери в которых могут быть по-разному истолкованы. Изложенным методом можно определить только полные потери в конденсаторе, а их распределение между диэлектриком и обкладками устанавливается с привлечением дополнительных данных (полученных, например, при моделировании конденсатора).

Список литературы

1. Тареев Б. М., Лернер М. М., Лернер Т. И. К расчету тепловых потерь в электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения. — «Электричество», 1970, № 5, с. 72—78.
2. Лернер М. М. Учет длительности нарастания несинусоидального напряжения при расчете потерь в конденсаторе. — «Электричество», 1971, № 2, с. 69—72.
3. Лернер М. М. Расчет потерь в электрическом конденсаторе при импульсном воздействии с произвольной скажностью. — «Электричество», 1972, № 3, с. 52—56.
4. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М., «Энергия», 1973. 328 с.

[30.7.1973]



УДК 621.359.42

Влияние технологических параметров газов на эффективность электрофильтров

Доктор техн. наук ЛЕВИТОВ В. И.

ЭНИН

канд. техн. наук РЕШИДОВ И. К., инж. КИЗИМ И. А.

Семибратовский филиал НИИОГАЗ

Сжигание на крупных тепловых электростанциях с мощными энергоблоками высокосольных углей (например экибастузских) потребовало значительного повышения эффективности работы электрофильтров, предназначенных для очистки больших объемов дымовых газов с высокой начальной запыленностью.

В связи с этим был выполнен цикл научно-исследовательских работ, направленных в первую очередь на создание рациональных систем коронирующих и осадительных электродов. Параллельно изучалась в условиях эксплуатации работа электрофильтров старого типа с целью выявления основных причин их низкой эффективности. Такие исследования на Троицкой ГРЭС электрофильтров ИГД-3-38 ПБЦ, степень очистки в которых не превышала 87,5%, показали [Л. 1], что одной из таких основных причин является интенсивная обратная корона,

обусловленная высоким удельным электрическим сопротивлением золы экибастузского угля (10^{13} ом·см) и характерным для коронирующих проводов штыкового сечения неравномерным распределением тока по поверхности осадительных электродов.

Последнее приводит к существенному повышению напряженности электрического поля в отдельных точках осажденного слоя, что облегчает возникновение обратной короны и повышает ее интенсивность.

Снижение вероятности возникновения обратной короны и ограничение ее интенсивности может быть достигнуто уменьшением удельного электрического сопротивления золы и обеспечением возможно более равномерного распределения тока по поверхности осадительных электродов при одновременном уменьшении максимальной плотности тока. Первое может быть

обеспечено путем кондиционирования дымовых газов, а второе — путем применения игольчатых коронирующих электродов с малым шагом между иглами.

Последнее иллюстрируется данными табл. 1, где приведены экспериментальные значения максимальных плотностей тока и их отношений к средним плотностям (коэффициент неравномерности K) для игольчатых электродов и провода штыкового сечения.

Из табл. 1 видно, что при равных удельных токах короны (ток на единицу длины коронирующих электродов) максимальные плотности тока и коэффициенты неравномерности для игольчатых электродов остаются существенно ниже соответствующих величин для проводов штыкового сечения. Даже при равных напряжениях, когда удельный ток короны игольчатых электродов существенно превышает ток провода штыкового сечения, максимальные плотности тока остаются более чем в 2 раза ниже. При этом уменьшение шага между иглами способствует более равномерному распределению тока по поверхности осадительных электродов.

Использование игольчатых электродов с обычной высотой игл (12 мм) даже при уменьшенном шаге между иглами не во всех случаях может оказаться действенной мерой борьбы с обратной короной. В отдельных случаях требуется снижение при неизменном напряжении удельных токов короны, что может быть достигнуто либо уменьшением длины игл, либо поворотом обычных игольчатых электродов на 90°.

Последнее, как показали зондовые исследования электрического поля короны, результаты которых для обычного и повернутого расположения игольчатых электродов приведены на рис. 1, а и б, сопровождается выравниванием поля в направлении движения потока газа. Одновременно удельные токи короны уменьшаются примерно на 30%, а максимальная плотность тока вдвое (рис. 1, в).

Найденные на основании лабораторных исследований решения о рациональной форме коронирующих электродов требовали проверки в условиях эксплуатации электрофильтров на электростанциях. Это было необходимо еще и потому, что эффективность работы электрофильтров в значительной степени определяется такими факторами, как действительное электрическое сопротивление золы и ее адгезионные свойства, начальная запыленность, температура и влажность дымовых газов. Влияние всех этих факторов на показатели работы электрофильтров наиболее полно и достоверно можно выявить лишь на основе их промышленных испытаний в натурных условиях.

Промышленные исследования были выполнены в два этапа. Первоначально была осуществлена реконструкция одного из электрофильтров ПГД-3-38 ПБЦ энергоблока 300 Мвт Троицкой ГРЭС. При реконструкции коронирующие электроды штыкового сечения были заменены на игольчатые электроды с шагом игл 80 мм, желобчатые осадительные электроды на С-образные широкополосные, усилено встряхивание осадительных электродов и вместо прямоточных циклонов установлено дополнительное поле электрофильтра [Л. 2]. В результате реконструкции степень очистки газов возросла с 87,5% до 96,8% при снижении выходной запыленности в 5 раз. За счет подавления обратной короны в первых двух полях электрофильтра и уменьшения ее интенсивности в последующих полях эффек-

Таблица 1

Тип коронирующего электрода	U , кВ	i , ма/м	j , ма/м ²	K
Провод штыкового сечения 4× ×4 мм ²	50,0	0,052	2,5	17,3
	65,0	0,296	8,6	9,75
Ленточно-игольчатый электрод с шагом игл 40 мм	26,5	0,052	0,42	2,00
	50,0	0,392	1,86	1,71
	65,0	0,74	3,35	1,63
Ленточно-игольчатый электрод с шагом игл 80 мм	30,7	0,052	0,48	3,42
	50,0	0,301	2,05	2,45
	65,0	0,592	3,78	2,30

тивная скорость дрейфа увеличилась на 30% и составила 10 см/сек при скорости газа 2,47 м/сек.

На втором этапе работы был создан и смонтирован на Троицкой ГРЭС опытный электрофильтр, представляющий собой четырехполюсный аппарат с активным сечением 60 м² и длиной каждого поля 2,5 м, высотой электродов 12 м и расстоянием между осадительными электродами 275 мм. Осадительные электроды — С-образные, а коронирующие электроды — ленточно-игольчатые. Встряхивание электродов — молотковое.

Питание электроэнергией каждого поля электрофильтра осуществлялось раздельно от однотипных электроагрегатов АИФ-400.

В опытном электрофильтре сначала были установлены ленточно-игольчатые коронирующие электроды с шагом игл 80 мм. В дальнейшем они были заменены на электроды с шагом игл 40 мм. Как в первом, так и во втором случаях на двух последних полях электрофильтра с наиболее интенсивной обратной короной для ограничения средних токов был использован поворот ленточно-игольчатых электродов на 90°.

Из табл. 2, где представлены результаты испытаний опытного электрофильтра с игольчатыми электродами с шагом игл 80 и 40 мм, следует, что при уменьшении шага между иглами степень очистки газов увеличилась.

Сравнение электрических параметров показывает, что уменьшение шага позволило в 2—3 раза увеличить удельные токи короны в первых двух полях при практически неизменном напряжении электрофильтра, т. е. полезная мощность коронного разряда увеличилась. Поворот игольчатых элементов на 90° привел к выравниванию токовых нагрузок по полям электрофильтра. Некоторое снижение рабочего напряжения на двух последних полях вызвано интенсификацией обратной короны из-за снижения влажности дымовых газов по условиям работы котлоагрегата (влажность топлива в экспериментах с шагом игл 40 мм была ниже в 1,5 раза).

Опыт с отключением первых двух полей по напряжению (третье и четвертое поля работают в режиме первого — второго), проведенный при одинаковой влажности газов, показал, что напряжение на двух последних полях увеличилось на 30% (рис. 2). При этом существенно сузилась петля, характеризующая интенсивность обратной короны [Л. 1].

Таким образом, исследования на промышленном электрофильтре подтвердили, что применение игольчатых электродов

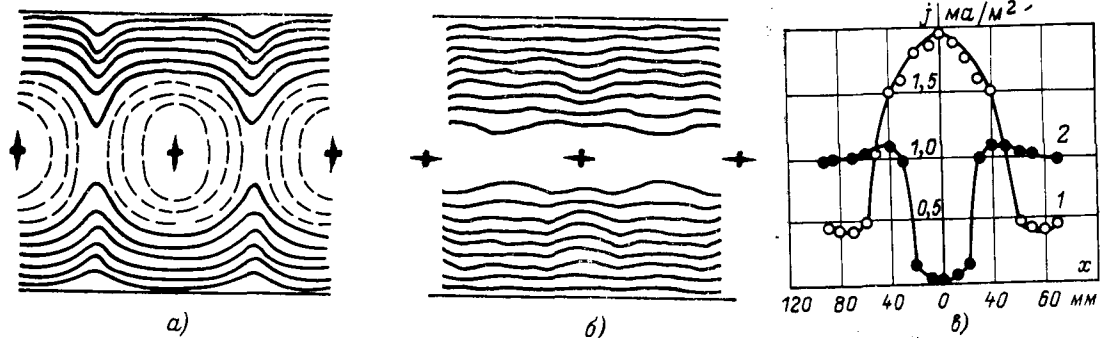


Рис. 1. Характеристики ленточно-игольчатых коронирующих электродов с шагом между иглами 20 мм.

а — эквипотенциалы поля без разворота электродов при $U_{пр}=50$ кВ, $i=0,345$ ма/м; б — эквипотенциалы поля при развороте электродов на 90° (параллельно плоскости) $U_{пр}=50$ кВ, $i=0,239$ ма/м; в — распределение плоскости тока по поверхности плоскости без разворота электродов (1) и с разворотом электродов на 90° (2).

Таблица 2

Шаг иглоок, мм	Скорость газа, м/сек	Температура газа, °С		Запыленность газа, г/мм²		Степень очистки газа, %	Электрический режим							
		перед электро- фильтром	после электро- фильтра	перед электро- фильтром	после электро- фильтра		I поле		II поле		III поле		IV поле	
							$U_{пр}$ кВ	i , мА	$U_{пр}$ кВ	i , мА	$U_{пр}$ кВ	i , мА	$U_{пр}$ кВ	i , мА
80	1,64	127	122	59,8	2,28	95,9	33,8	100	38,6	104	36,2	120	35,2	260
40	1,71	126	118	54,0	0,82	98,0	36,5	200	38,4	310	34,6	190	34,4	342
80	1,67	136	130	52,7	2,70	94,5	33,0	110	38,0	100	37,0	105	34,0	280
40	1,72	135	122	53,0	1,63	96,5	36,0	260	33,0	430	32,5	180	32,0	360
80	1,74	144	135	54,2	1,75	96,6	33,0	100	38,0	110	35,4	120	34,6	280
40	1,75	145	132	43,0	1,27	96,7	31,5	220	28,8	420	26,4	160	27,0	250
80	1,94	145	135	61,0	7,0	87,2	29,0	220	27,0	290	25,5	145	29,5	310
40	2,25	146	140	43,0	4,7	88,0	31,8	220	29,8	357	26,8	168	26,9	275

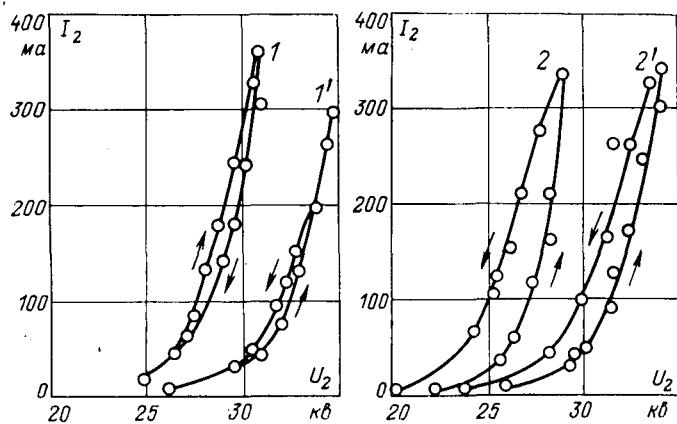


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики опытного электрофильтра на газе ($v_{эф}=1,7$ м/сек, $t_{эф}=146^\circ\text{C}$).
1, 2 — характеристики первого и второго полей; 1', 2' — характеристики третьего и четвертого полей (первое и второе поля отключены).

с малым шагом между иглами и разворотом последних по ходу газа уменьшают интенсивность обратной короны. Однако ввиду чрезмерно высокого удельного электрического сопротивления золы экибастузского угля в исследованном диапазоне температуры уходящих газов указанные мероприятия не позволили устранить обратную корону. Поэтому был исследован второй путь снижения ее интенсивности — увеличение проводимости золы. С этой целью на опытном электрофильтре с электродами высотой 12 м изучалось влияние технологических параметров (скорость и температура дымовых газов) на работу электрофильтра, а также возможность повышения степени очистки газов путем химического кондиционирования.

Экспериментальные зависимости степени очистки газов и эффективной скорости дрейфа частиц от скорости газа в электрофильтре представлены на рис. 3. Для сравнения здесь также приведены те же зависимости для электрофильтра аналогичной конструкции, но с электродами высотой 7,5 м. Скорость дрейфа определялась по уравнению Дейча [Л. 3]. Из полученных данных следует, что с увеличением скорости газа эффективность осаждения золы существенно снижается, а эффективная скорость дрейфа растет. С ростом температуры газов эта зависимость менее выражена и при $t=156^\circ\text{C}$ скорость дрейфа практически не зависит от скорости газа в исследованном диапазоне.

Зависимости степени очистки газов, эффективной скорости дрейфа и напряжения на электродах опытного электрофильтра от температуры дымовых газов приведены на рис. 4. Здесь видно, что увеличение температуры газов резко снижает степень очистки и эффективную скорость дрейфа, причем скорость дрейфа изменяется по линейному закону. Так, при скорости газа 1,7 м/сек увеличение температуры на 28°C ведет к снижению степени очистки газов с 98 до 87%, а скорости дрейфа — в 1,8 раза. Такое резкое снижение эффективности осаждения золы объясняется интенсификацией обратной короны с ростом температуры газов, что подтверждается снижением напряжения на электродах электрофильтра. Расчеты по формуле Дейча

показывают, что при прочих равных условиях для получения в электрофильтре степени очистки газов порядка 98% при температуре 154°C (эксплуатационное значение), размеры электрофильтра необходимо увеличить в 1,8 раза. Таким образом, температура газов является одним из решающих факторов, влияющих на эффективность работы электрофильтров. Электрофильтры, улавливающие золу экибастузского угля, могут обеспечить высокую степень очистки газов при температуре, не превышающей $110-120^\circ\text{C}$.

Однако даже в условиях повышенных температур эффективность улавливания золы электрофильтрами может быть существенно увеличена кондиционированием дымовых газов. На основании литературных данных в качестве химического реагента был выбран аммиак. При добавке в дымовые газы перед опытным электрофильтром аммиака в количестве 8—32 миллионных объемных долей (м. о. д.) при скорости газа 1,5 м/сек степень очистки газов возросла с 88,4 до 98,3%. На рис. 5 показаны зависимости степени очистки газов и электрических параметров опытного электрофильтра от расхода аммиака, из которых следует, что, начиная с 20—25 миллионных объемных долей, дальнейшее увеличение расхода аммиака не приводит к повышению эффективности осаждения золы, т. е. данный расход следует считать оптимальным при кондиционировании дымовых газов для электрофильтров, улавливающих высокоомную золу экибастузского угля.

При данном расходе аммиака выходная запыленность снизилась более, чем в 6 раз и составила $0,8 \text{ г/мм}^3$. Увеличение степени очистки газов произошло за счет уменьшения интенсивности обратной короны, что подтверждается изменением

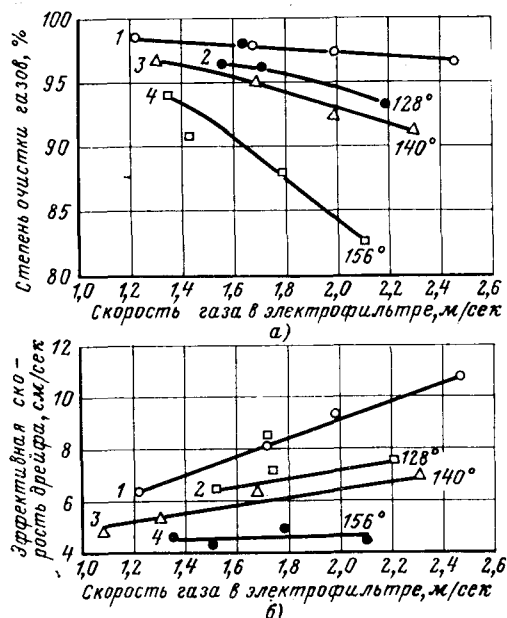


Рис. 3. Зависимость степени очистки газов и эффективной скорости дрейфа от скорости газа в электрофильтре.
а — степень очистки газов; б — эффективная скорость дрейфа.

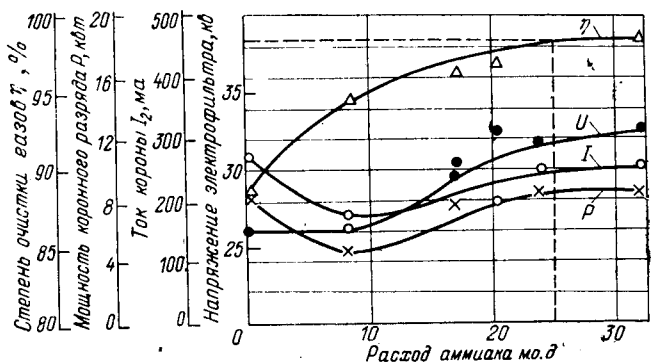
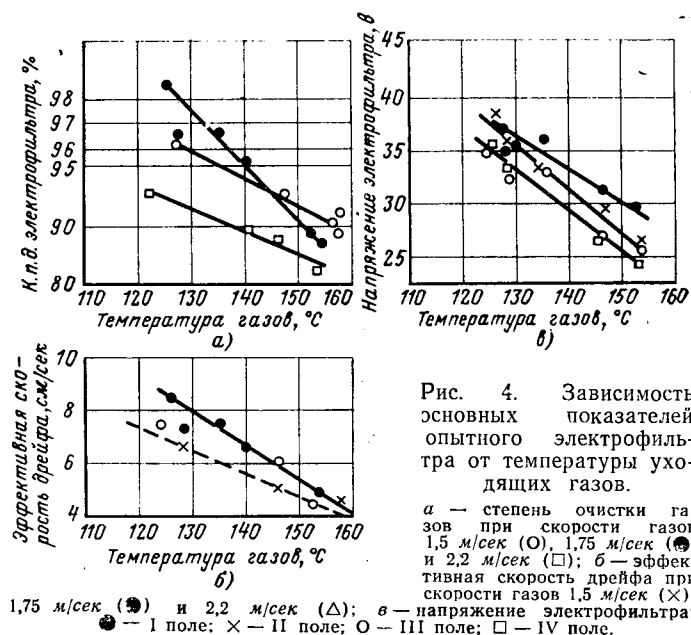


Рис. 5. Зависимость основных показателей опытного электрофильтра от расхода аммиака.

Технико-экономическое обоснование кондиционирования дымовых газов при улавливании золы было выполнено на примере энергоблока 300 Мвт Троицкой ГРЭС.

Расчеты показали, что кондиционирование аммиаком позволяет получить за счет увеличения срока службы дымососов экономический эффект более 100 тыс. руб. в год на блок.

Вполне понятно, что введение аммиака — не единственный путь кондиционирования дымовых газов. Поэтому любые другие экономичные способы кондиционирования заслуживают внимания и могут быть использованы наряду с исследованным в тех случаях, когда эксплуатационные температуры дымовых газов заметно превышают проектные величины.

Список литературы

1. Особенности электрической очистки дымовых газов от золы экибастузского угля. — «Электрические станции», 1970, № 6, с. 6—9. Авт.: Г. С. Чеканов, И. А. Кизим, И. К. Решидов, О. Н. Ильинская.
2. Результаты реконструкции электрофильтра ПГД-3-38 ПБЦ на Троицкой ГРЭС. — «Электрические станции», 1972, № 8, с. 35—37. Авт.: И. А. Кизим, Л. А. Кисельман, И. К. Решидов, Г. С. Чеканов.
3. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., «Химия», 1967.

[11.10.1973]



ПОПРАВКА

В «Электричестве» № 4, 1974 г. была напечатана информация о выходе во II квартале 1974 г. в издательстве «Энергия» книги А. А. Шелихова «Единая система ЭВМ».

Книга объявлена в «Бланке-заказе» № 21, 1974, поз. 21. Заказы можно оформить во всех местных книжных магазинах, имеющих отделы технической книги.

В информации ошибочно указано о направлении заказов на книгу в Отдел распространения издательства «Энергия».

Определение установившихся режимов больших энергосистем методом подсистем

Канд. техн. наук ХАЧАТРЯН В. С.

Ереван

В настоящее время существует ряд методов расчета установившихся режимов энергосистем, которые успешно можно применять при решении указанной задачи для энергосистем с небольшим количеством узловых точек. Для расчетов установившихся режимов современных больших энергосистем требуется разработка новых методов, обеспечивающих [Л. 1]:

1) инженерную наглядность восприятия процессов, происходящих как в большой энергосистеме в целом, так и в отдельных ее звеньях;

2) резкое уменьшение объема вычислительных работ;

3) существенное уменьшение занимаемой памяти ЦВМ, приводящее к увеличению возможности решения задачи.

Первое требование действительно является весьма решающим моментом при исследовании установившихся режимов больших энергосистем. При анализе больших энергосистем почти полностью исчезает наглядность происходящих в них физических процессов и весьма затрудняется проведение каких-либо серьезных количественных и качественных исследований. Поэтому весьма актуальна при таком анализе проблема упрощения обеспечивающего необходимую наглядность восприятия физических процессов, происходящих как в объединении в целом, так и в отдельных его подсистемах. Следует заметить при этом, что решение режимных проблем современных больших энергосистем нельзя полностью связывать с совершенствованием ЦВМ, так как проблема наглядности всегда остается открытой.

В последнее время для расчетов установившихся режимов больших энергосистем признана получила идея представления больших систем как совокупности отдельных подсистем. Эта идея действительно удовлетворяет тем вышеприведенным требованиям, которые предъявляются при построении теории определения установившихся режимов больших энергосистем.

Идея представления больших систем как совокупности отдельных подсистем развивалась параллельно в двух принципиально разных направлениях. Первое направление [Л. 2 и 4] связано с представлением заданной большой системы как совокупности радиально связанных подсистем (рис. 1). Основные положения второго направления даются в [Л. 3], согласно которому заданную большую систему представляют совокупностью несвязанных подсистем, либо связанных в одной точке (рис. 2).

На основании указанных двух принципов представления систем разработаны методы и алгоритмы для расчетов уста-

новившихся режимов больших энергосистем [Л. 5—12]. В [Л. 12] предложен метод определения установившихся режимов больших энергосистем, основанный на идее представления системы совокупностью радиально связанных подсистем при задании активных и реактивных мощностей как станционных так и нагрузочных узлов. В настоящей статье описывается метод определения установившихся режимов больших энергосистем, также основанный на идее [Л. 2] и применимый при любой форме задания исходной информации относительно отдельных узлов.

Постановка задачи. Рассматривается схема замещения большой энергосистемы любой сложности совокупностью радиально связанных N подсистем (рис. 1), имеющих соответственно порядок $M_1, M_2, \dots, M_N$. Каждый узел энергосистемы характеризуется четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной мощностями, модулем и аргументом комплексного напряжения. Из четырех параметров для каждого узла задаются лишь два, а остальные определяются решением нелинейных алгебраических уравнений установившихся режимов, составленных на основании Z -формы задания состояния сети.

Принимается следующая система исходной информации относительно отдельных узлов:

1) базисный (балансирующий) узел, для которого задаются модуль и аргумент комплексного напряжения; необходимо определить активную и реактивную мощности;

2) станционный узел, для которого задаются активная мощность и модуль напряжения; необходимо определить реактивную мощность и аргумент напряжения; или задаются активная и реактивная мощности и необходимо определить модуль и аргумент напряжения;

3) нагрузочный узел, для которого задаются активная и реактивная мощности, и необходимо определить модуль и аргумент комплексного напряжения.

Таким образом, каждый узел энергосистемы при расчете установившихся режимов характеризуется двумя фиксированными (заданными) и двумя свободными (исковыми) параметрами.

Решение задачи. Теоретические основы применения идеи представления заданной большой энергосистемы как совокупности радиально связанных подсистем [Л. 2] подробно освещены в [Л. 9, 11 и 12]. Поэтому здесь остановимся только на алгоритме решения задачи, вытекающей из вышеуказанных

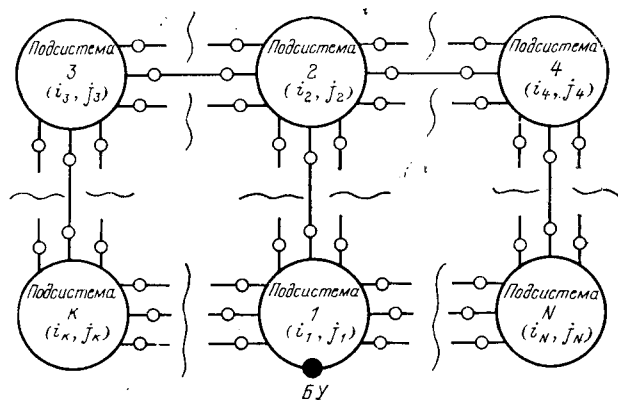


Рис. 1. Представление большой энергосистемы как совокупности радиально связанных подсистем.

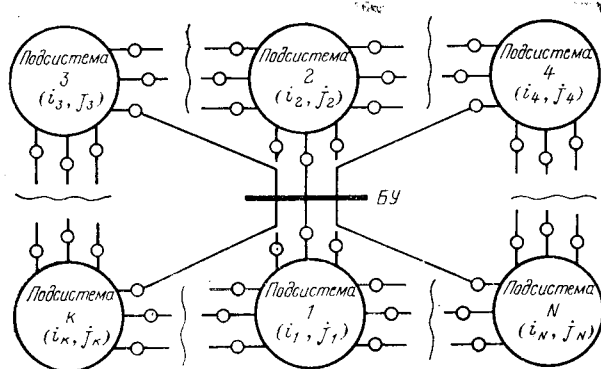


Рис. 2. Представление большой энергосистемы совокупностью отдельных подсистем, связанных через одну точку или через землю.

Структуры Z -матриц отдельных подсистем будут иметь следующий вид:

для подсистемы 1, написанной относительно исходного базисного узла БУ:

$$Z_I = \begin{array}{c|cc} & 2 & 3 \\ \hline 1 & 9,3162 + j15,9260 & 5,6488 + j11,2098 \\ \hline 2 & 10,3058 + j20,8572 & 5,9241 + j14,1120 \\ \hline 3 & 7,6210 + j18,8510 & \end{array} \quad (22)$$

Для подсистемы 2, написанной относительно временного базисного узла 3:

$$Z_{II} = \begin{array}{c|cc} & 5 & 6 \\ \hline 4 & 5,7000 + j11,2000 & 5,7000 + j11,2000 \\ \hline 5 & 16,0320 + j27,1850 & 9,1390 + j16,3790 \\ \hline 6 & 12,4560 + j20,4530 & \end{array} \quad (23)$$

Для подсистемы 3, написанной относительно временного базисного узла 6:

$$Z_{III} = \begin{array}{c|cc} & 8 & 9 \\ \hline 7 & 12,1000 + j25,4000 & 12,1000 + j25,4000 \\ \hline 8 & 18,8560 + j34,6530 & 15,5390 + j30,5790 \\ \hline 9 & 22,4320 + j41,3850 & \end{array} \quad (24)$$

Для отдельных подсистем ΔZ_i -матрицы будут записываться как:

$$\Delta Z_I = \begin{array}{c|cc} & 1-9 & 5-8 \\ \hline 1 & 6,0601 + j8,3414 & 0,0000 + j0,0000 \\ \hline 2 & -0,2753 - j2,9022 & 0,0000 + j0,0000 \\ \hline 3 & -4,3649 - j11,2664 & 0,0000 + j0,0000 \end{array} \quad (25)$$

$$\Delta Z_{II} = \begin{array}{c|cc} & 1-9 & 5-8 \\ \hline 4 & -5,7000 - j11,2000 & 0,0000 + j0,0000 \\ \hline 5 & -9,1390 - j16,3790 & 6,8930 + j10,8060 \\ \hline 6 & -12,4560 - j20,4530 & -3,3170 - j4,0740 \end{array} \quad (26)$$

$$\Delta Z_{III} = \begin{array}{c|cc} & 1-9 & 5-8 \\ \hline 7 & -12,1000 - j25,4000 & -12,1000 - j25,4000 \\ \hline 8 & -15,5390 - j30,5790 & -18,8560 - j34,6530 \\ \hline 9 & -22,4320 - j41,3850 & -15,5390 - j30,5790 \end{array} \quad (27)$$

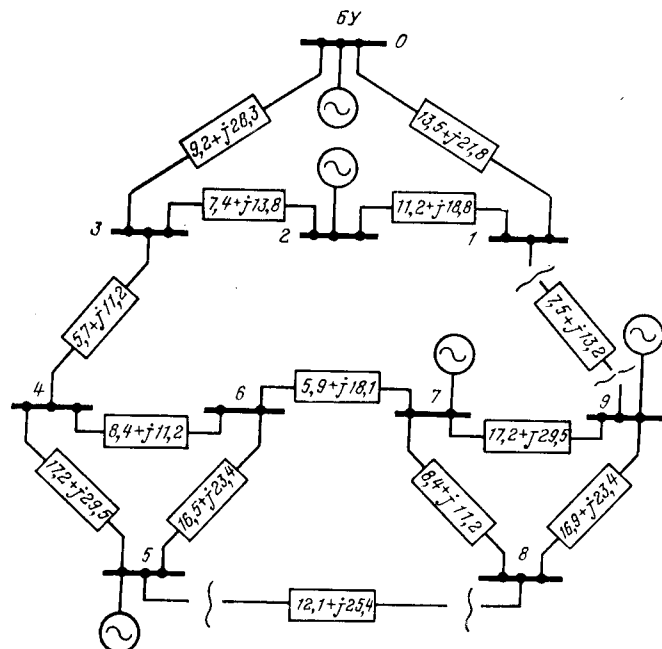


Рис. 4. Представление рассматриваемой энергосистемы как совокупности радиально связанных трех подсистем.

С другой стороны, имеем:

$$(\Delta Z)^{-1} = \begin{array}{c|cc} & 1-9 & 5-8 \\ \hline 1-9 & 52,8130 + j94,6458 & 18,8560 + j34,6530 \\ \hline 5-8 & 41,1660 + j74,9330 & \end{array}^{-1} =$$

$$= \begin{array}{c|cc} & 1-9 & 5-8 \\ \hline 1-9 & 0,005432 - j0,009667 & -0,002524 - j0,004450 \\ \hline 5-8 & 0,006804 - j0,012300 & \end{array}$$

Следует отметить, что элементы матриц (22)–(24) будут отличаться от тех элементов, которые получаются при построении полной матрицы (Z -матрица неразрезанной схемы) относительно исходного и единственного базисного узла. Поэтому, как уже было сказано, необходимо также определить собственные сопротивления станционных узлов. В рассматриваемой схеме замещения станционными узлами являются узлы 2, 5, 7, 9 и балансирующий узел. Собственные сопротивления необходимо определить для тех станционных узлов, для которых задаются активные мощности и модули напряжений.

Для данной схемы в таблице задана следующая исходная информация режима.

Исходные режимные данные

Узлы	$P, \text{ Мвт}$	$Q, \text{ Мвар}$	$U, \text{ кВ}$	$\phi_U, \text{ град}$
ЭС-БУ	—	—	220,0	0
ЭН-1	110,0	50,0	—	—
ЭС-2	106,0	—	216,1	—
ЭН-3	60,0	28,0	—	—
ЭН-4	104,0	51,0	—	—
ЭС-5	85,0	—	202,7	—
ЭН-6	100,0	48,0	—	—
ЭС-7	60,0	136,7	—	—
ЭН-8	94,0	45,0	—	—
ЭС-9	80,0	—5,8	—	—

Как нетрудно заметить из таблицы, только для станционных узлов 2 и 5 задаются активные мощности и модули напряжений, а для остальных задаются активные и реактивные мощности. Поэтому необходимо определить собственные сопротивления (Z_{22} , Z_{55}) только для этих двух станционных узлов относительно исходного базисного узла (БУ), которые в результате будут иметь следующие значения:

$$\begin{bmatrix} Z_{22} \\ Z_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10,3388 + j20,8175 \\ 16,2236 + j31,0087 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Устанавливаем значения узловых комплексных токов:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,5000 + j0,2273 \\ 0,4905 + j0,0000 \\ -0,2727 + j0,1273 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,4727 + j0,2318 \\ 0,4206 + j0,0000 \\ -0,4845 + j0,2182 \end{bmatrix}; \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2727 - j0,6214 \\ -0,4273 + j0,2045 \\ 0,3636 - j0,2614 \end{bmatrix}.$$

После проведения шести итераций согласно вышеприведенной последовательности с точностью 10^{-4} определяются значения комплексных узлов напряжений для всех узлов, чем и полностью характеризуется режим рассматриваемой схемы:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 211,6671 - j5,1056 \\ 216,0890 - j4,4541 \\ 209,6053 - j7,2622 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_4 \\ \dot{U}_5 \\ \dot{U}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 202,8590 - j9,6246 \\ 202,6821 - j3,6291 \\ 202,0740 - j10,0739 \end{bmatrix}; \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_7 \\ \dot{U}_8 \\ \dot{U}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 209,7201 - j8,0138 \\ 205,2273 - j7,3737 \\ 210,9422 - j3,9007 \end{bmatrix}.$$



Нетрудно заметить, что модули $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_5$ действительно равны заданным модулям станционных узлов согласно приведенным исходным данным таблицы.

На основании предложенного алгоритма в [Л. 12] и в настоящей работе составлена программа для ЦВМ «Урал-14Д». Пользуясь только оперативной памятью данной ЦВМ, как уже отмечалось в [Л. 12], можно рассчитывать установившиеся режимы энергетических сетей, содержащих до 400–500 узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В. А. О задачах научно-технических разработок, связанных с проблемой АСУ ЕЭС СССР. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1972, № 2, с. 22–33.
2. Хачатрян В. С. К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем. — «Электричество», 1964, № 10, с. 47–51.
3. Крон Г. Исследование сложных систем по частям — диакоптика. М., «Наука», 1972.
4. Happ Н. Н. Z — Diacoptics — Torn subdivisions radially attached. — «IEEE Transactions on PAS», v. 96, 1967, № 6, p. 751–767.
5. Brown Н. Е., Carter С. К., Happ Н. Н., Person С. Е. Power flow solution by impedance matrix iterative method. — «IEEE Transactions on PAS», v. 82, 1963, № 4, p. 1–10.
6. Brown Н. Е., Carter С. К., Happ Н. Н., Person С. Е. Z — matrix algorithms in load — flow programs. — «IEEE Transactions on PAS», v. 87, 1968, № 3, p. 807–814.
7. Andretich R. G., Brown Н. Е., Happ Н. Н., Person С. Е. The piecewise solution of the impedance matrix load flow. — «IEEE Transactions on PAS», v. 87, 1968, № 10, p. 1877–1882.
8. Andretich R. G., Henson D. H., Brown Н. Е., Happ Н. Н. Piecewise load flow solutions of large size networks. — «IEEE Transactions on PAS», v. 90, 1971, p. 1, № 3, p. 950–961.
9. Хачатрян В. С. Диакоптика и проблема расчета режимов больших энергосистем. — В сб.: Научно-техническая конференция «Основные направления и технические решения по созданию АСУ энергетикой и применение вычислительной техники». Киев, 1972, ч. II, с. 16–20.
10. Фазылов Х. Ф., Брискин И. Л., Насыров Т. Х. Алгоритмы расчетов установившихся режимов больших электрических систем. — «Электричество», 1972, № 9, с. 11–14.
11. Хачатрян В. С., Суханов О. А. Диакоптика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем. — «Электричество», 1973, № 4, с. 1–10.
12. Хачатрян В. С. Метод и алгоритмы расчета установившихся режимов больших энергосистем. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 4, с. 45–57.

[25.1 1974]

УДК 62-83:62-503.53

Комбинированный метод исследования быстродействующего следящего электропривода при дискретном сигнале управления на физической и математической моделях

Канд. техн. наук КОРЫТИН А. М., инж. СОКОЛОВА Е. М.

Одесский политехнический институт

Повышение точности воспроизведения технологических операций производственными механизмами определяет особые требования, предъявляемые к автоматизированному, в частности, следящему электроприводу. Последний позволяет обрабатывать с высокой степенью точности и повторяемости сложные перемещения рабочего органа по выработанному сигналу. Так как требования повышения качества управления непрерывно возрастают, необходимо учитывать различные факторы, влияющие на обработку сигнала управления. К таким факторам относятся влияния упругих звеньев, сил сухого трения, люфтов, а также ряда составляющих возмущающего воздействия, как распределенных по кинематической цепи меха-

низма, так и связанных с технологическими особенностями. Учет случайных возмущений и многочисленных особенностей производственного механизма возможен с помощью организованной системы информации, поступающей к специализированной ЦВМ или вычислительной машине общего назначения, работающей по заданному алгоритму. Формирование сигнала управления в этом случае воспроизводится в виде импульса, длительность которого определяется промежутком между двумя смежными опросами информационной системы и может меняться в известных пределах, а скважность сигнала определяется объемом информации и быстродействием решающего комплекса. Возникает, таким образом, задача исследования

поведения следящего электропривода при дискретном сигнале управления. Результаты такого исследования изложены в статье.

Точность обработки сигнала управления в следящем электроприводе зависит от быстродействия таких его звеньев, как двигатель и преобразователь энергии, питающий якорь. В связи с этим в качестве объекта исследования избрана система с малоинерционным двигателем и тиристорным преобразователем, структурная схема которой показана на рис. 1. Дискретность имитировалась замыканием и размыканием контакта геркона, стоящего в прямом канале после выхода фазового детектора. Катушка геркона питалась от звукового генератора частоты, при изменении частоты которого менялась дискретность сигнала управления. На схеме рис. 1 показаны фильтры, стоящие на выходе усилителя УПТ, на котором выполнена коррекция, а также фильтры усилителя тиристорного преобразователя. Эти устройства, характеризующиеся собственной постоянной времени, влияют на быстродействие системы.

Сочетание двух дискретностей — сигнала управления и напряжения тиристорного преобразователя — затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным использование для анализа поведения системы аналитических методов [Л. 1] и, в частности, общепринятый метод анализа по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам. Поэтому была принята методика исследований на физической модели в сочетании математическим моделированием процессов. Такой подход позволяет определить следующую программу исследования. Из рассмотрения исключается одна дискретность — импульсный сигнал управления — и оценивается точность моделирования процессов. Параметры физической модели полностью соответствовали параметрам проектируемой установки. Математическая модель формировалась на базе известных параметров модели физической.

При допустимых погрешностях процессов на физической и математической моделях исследования, проводимые на первой, дают подробную картину с учетом влияния всех факторов, в том числе и фильтров, на динамику системы, в то время как исследование на АВМ позволяет оценить поведение системы без учета второстепенных, неучтенных при моделировании процессов, и влияния фильтров, которые по своим частотным характеристикам не подлежат моделированию. Таким образом, появляется возможность оценить работу идеализированной системы, к которой можно приблизить реальную путем улучшения качества ее элементов, блоков и отдельных узлов. Следовательно, предложенная методика исследования позволяет оценить влияние параметров дискретного сигнала и качество самой системы на процессы управления.

Для следящей системы, представленной на рис. 1, справедливы следующие физические и машинные уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega; \\ \frac{d\bar{\vartheta}}{d\tau} &= \frac{m_{\vartheta}}{m_{\omega} m_t} \bar{\omega}; \\ u_{\delta} &= k_p k_{\delta} (\vartheta_{\delta} - \bar{\vartheta}); \\ \bar{u}_{\delta} &= k_{\delta} k_p \frac{m_{u_{\delta}}}{m_{\delta}} (\bar{\vartheta}_{\delta} - \bar{\vartheta}); \\ \frac{u_{\kappa}}{u_{\delta}} &= \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p}; \end{aligned}$$

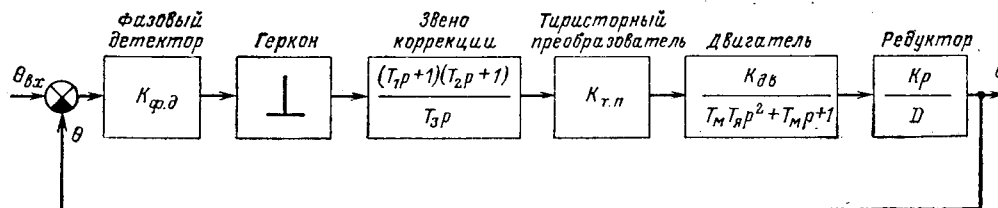


Рис. 1. Структурная схема быстродействующего следящего электропривода.

$$\begin{aligned} \bar{u}_{\kappa} &= \frac{T_1 T_2}{T_3} p \bar{u}_{\delta} \frac{m_{u_{\kappa}}}{m_{u_{\delta}}} + \frac{T_1 + T_2}{T_3} \bar{u}_{\delta} \frac{m_{u_{\kappa}}}{m_{u_{\delta}}} + \\ &+ \frac{1}{T_3 p} \bar{u}_{\delta} \frac{m_{u_{\kappa}}}{m_{u_{\delta}}}; \\ e_{np} - e_{дв} &= i_{\kappa} r_{\kappa} + T_{\kappa} p i_{\kappa} r_{\kappa}; \\ \bar{i}_{\kappa} &= \frac{1}{p} \left(\frac{\bar{e}_{np}}{T_{\kappa} r_{\kappa}} \frac{m_i}{m_e m_t} - \frac{\bar{e}_{дв} m_i}{T_{\kappa} r_{\kappa} m_e m_t} - \frac{\bar{i}_{\kappa}}{T_{\kappa}} \frac{1}{m_t} \right); \\ M - M_c &= J p \omega; \\ e_{дв} &= \frac{1}{p} \left(\bar{i}_{\kappa} \frac{r_{\kappa}}{T_m} \frac{m_e}{m_i m_t} - \bar{i}_c \frac{r_{\kappa} m_e}{T_m m_i m_t} \right), \end{aligned}$$

где ω — скорость двигателя; u_{δ} — напряжение, пропорциональное рассогласованию следящей системы; k_{δ} — коэффициент усиления измерителя рассогласования; k_p — коэффициент редукции; u_{κ} — напряжение на выходе корректирующего звена; T_1, T_2, T_3 — постоянные времени звена коррекции; e_{np} — напряжение на выходе тиристорного преобразователя; $e_{дв}$ — э. д. с. двигателя; $\vartheta_{\delta}, \bar{\vartheta}$ — соответственно углы задания рассогласования и поворота выходного вала следящей системы; i_{κ} — ток якорной цепи; $r_{\kappa}, T_{\kappa}, T_m$ — параметры якорной цепи.

Эти уравнения позволяют осуществить набор модели на АВМ следящей системы, к которой добавлялась модель тиристорного реверсивного преобразователя, учитывающая дискретность и нелинейные свойства моделируемого устройства. На этой модели так же как и на физической исследовалась следящая система с тиристорным преобразователем, выполненным по мостовой схеме, в которой работают 12 управляемых тиристоров — по 6 тиристоров на каждую половину моста. Моделирование на АВМ каждого тиристора осуществлялось логическим бесконтактным блоком, представленным на рис. 2 [Л. 2]. На вход блока подается синусоидальное напряжение. После интегратора И1 формируется сигнал, назначение которого аналогично пилообразному напряжению реальной схемы. Напряжение на выходе сумматора \Sigma 2 сравнивается с управляющим, пропорциональным рассогласованию следящей системы. При их равенстве диод Д1 перестает шунтировать вход сумматора \Sigma 3; и часть синусоиды, определяемая сигналом управления, проходит на выход схемы. Аналогичным образом работают все остальные блоки, моделирующие тиристоры реальной реверсивной мостовой схемы.

Обоими методами было проведено исследование переходных процессов в следящей системе при отработке непрерывного входного сигнала. Как видно из сравнения осциллограмм рис. 3, по длительности процесса регулирования, максимальному перегулированию и колебательности отклонение между результатами испытаний не выходит за пределы 10—15%, что позволяет осуществлять исследование по предложенной выше программе.

Свойства следящей системы изменяются при подаче на ее вход дискретного сигнала с частотой 50 периодов. Это проявляется в снижении быстродействия и возникновении колебаний скорости. Ухудшение быстродействия можно объяснить влиянием нерегулярно поступающих на канал управления тиристорного преобразователя дискретных импульсов, не синхронизированных с частотой пилообразного напряжения. Вследствие этого начало каждого следующего импульса будет сопровождаться различным углом зажигания тиристоров. Нерегулярность приводит к увеличению времени управления. Однако в системе управления, исключающей помехи, увеличение длительности переходного процесса (математическое моделирование) в полтора-два раза меньше, чем на физической модели. Исследования показали, что на быстродействие системы с дискретным сигналом управления решающее значение оказывают помехи, возникающие при различных наводках, и применение в связи с этим достаточно мощных фильтров. Отличие быстродействия при непрерывном и дискретном сигналах управления на физической модели достигает 70%. Следовательно, важнейшим фактором

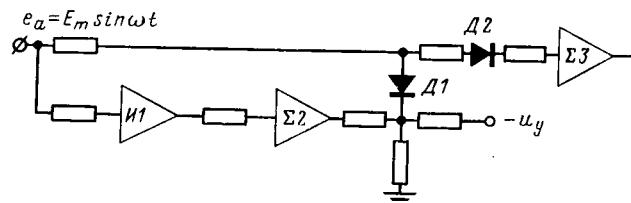


Рис. 2. Модель управляемого тиристора.

получения высокого качества динамики быстродействующей следящей системы с дискретным сигналом управления является помехоустойчивость ее элементов и, особенно, усилителей. Вариация параметров коррекции не приводит к существенному изменению быстродействия, которое остается неудовлетворительным при любом соотношении постоянных времени, обеспечивающих заданное качество.

Представляет интерес определение условий, при которых система, восприимчивая к помехам, позволяет обеспечить заданное быстродействие. Эти условия относятся к определению частоты дискретного сигнала, обеспечивающей заданные качества. Исследования при изменении частоты импульсов до 20 периодов показывают, что снижение частоты приводит к существенному ухудшению качества регулирования. Колебания скорости практически полностью воспроизводят частоту управляющих импульсов. Очевидно, пути увеличения быстродействия следует искать в повышении частоты управляющих импульсов, так как это приводит к большей повторяемости поступления управляющего импульса на фиксированную точку пилообразного напряжения, с одной стороны, и, с другой — к уменьшению помех от высокочастотных импульсов. Повышение частоты управляющих импульсов связано с возможностями информационного и вычислительного комплекса и ограничивается ими.

Аналогичный эффект имеет место при сохранении низкочастотных импульсов управления, но при питании тиристорного преобразователя от источника повышенной частоты. В этом случае затруднения, связанные с реализацией системы, определяются не только необходимостью вводить в схему источник напряжения повышенной частоты, но и необходимостью применять усилители специального исполнения и других элементов, рассчитанных на работу при высокой частоте.

Выводы. 1. Предложен комбинированный метод исследования на физической и математической моделях по разработанной программе, позволяющий оценить влияние параметров дискретного сигнала и качество элементов схемы быстродействующего следящего электропривода на процесс управления.

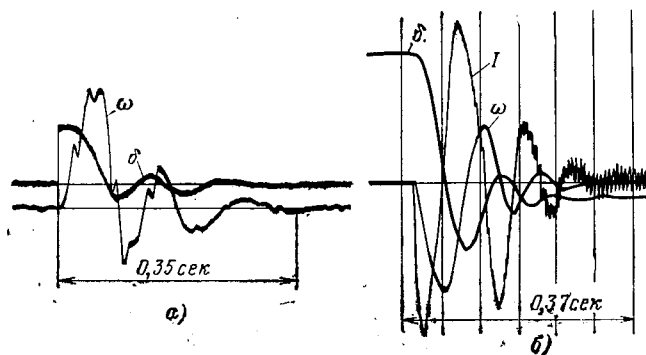


Рис. 3. Динамика отработки рассогласования следящим электроприводом при подаче на вход системы непрерывного управляющего сигнала.

а — осциллограмма, снятая на физической модели; б — решение, полученное на АВМ (ω — угловая скорость; I — ток двигателя; δ — угол рассогласования).

2. Показано, что реализация быстродействующего следящего электропривода с дискретным сигналом управления и тиристорным преобразователем, питающим двигатель, возможна для обеспечения высокого качества регулирования:

- а) при применении помехоустойчивых элементов в системе, исключающих необходимость использования мощных фильтров;
- б) в случае увеличения частоты сигнала управления, что ограничивается возможностями источника формирования импульсов;
- в) путем повышения частоты напряжения, питающего следящий электропривод, однако, в этом случае необходимо применять усилители и другие элементы схемы специального исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем. М., Физматгиз, 1963.
2. Бесконтактные модели тиристорных преобразователей для исследования электроприводов. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. М., Информэлектро, 1972. Авт.: Боровик В. Г., А. М. Корытин, Л. Е. Ладыгин и др.

[11.7.1973]

УДК 621.316.925.45

Полупроводниковое направленное реле сопротивления с использованием параметрического делителя частоты

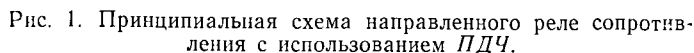
Канд. техн. наук ВАЙНШТЕЙН Р. А., инж. ПУШКОВ А. П.

Томский политехнический институт

Применяемые в настоящее время в схемах дистанционных защит направленные реле сопротивления как электромеханические, так и полупроводниковые, обладают существенным недостатком — наличием «мертвой зоны» по напряжению при коротком замыкании вблизи места установки защиты [Л. 1]. Устранение «мертвой зоны» при двухфазных коротких замыканиях производится введением дополнительной небольшой по значению э. д. с. от неповрежденной фазы. При трехфазных коротких замыканиях эта же э. д. с. поддерживается некоторое время с помощью резонансного контура. Время действия таких контуров памяти составляет 1,5—2 периода для элек-

тротехнических [Л. 2] и 2,5—3,5 периода для полупроводниковых реле сопротивления [Л. 3], что при случайном замедлении в действии как пусковых органов, так и выходных промежуточных реле может привести к отказу в действии защиты.

В статье показана возможность устранения «мертвой зоны» при всех многофазных коротких замыканиях вблизи места установки защиты у полупроводникового реле сопротивления с использованием электромагнитного параметрического делителя частоты (ПДЧ). Как показали исследования свойств ПДЧ, наиболее просто может быть выполнено реле сопротив-



На рис. 1 представлена принципиальная схема описываемого реле. Устранение «мертвой зоны» реле, выполненного по данной схеме, основано на подведении к нему дополнительного напряжения изменяющегося по значению и фазе в зависимости от удаленности точки короткого замыкания. Это напряжение подводится к реле во все время существования замыкания за счет энергии, получаемой от трансформаторов тока. В общем виде устройство для устранения «мертвой зоны» содержит удвоитель частоты, питающийся от трансформаторов тока, и подключенный к его выходу ПДЧ. При таком способе питания ПДЧ условия работы его не изменяются при изменении фазы тока на выходе удвоителя частоты на 180° . Так, если мгновенное значение тока при коротком замыкании в защищаемой зоне

$$i = I_m \sin 2(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

Практически эта зона однозначного возбуждения по фазе

$$I_B \leq I_{K \min}^{(2)}, \quad (6)$$

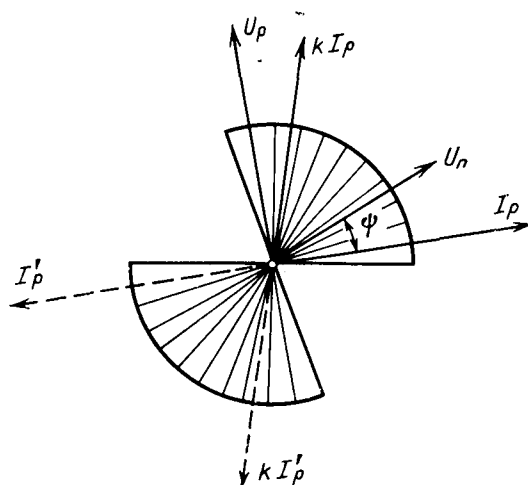


Рис. 2. Векторная диаграмма рабочего контура реле.

где $I_{\text{к min}}^{(2)}$ — ток при двухфазном коротком замыкании на границе «мертвой зоны» по напряжению [в минимальном режиме работы системы].

Значение тока $I_{\text{к min}}^{(2)}$ определяется при расчете токов короткого замыкания конкретной сети. Из совместного рассмотрения рис. 2 и рис. 3 следует, что при удаленных коротких замыканиях, когда ток недостаточен для возбуждения ПДЧ, напряжение $\dot{U}_n$ равно нулю или имеет малое значение относительно своего максимума и, кроме того, угол между напряжением тормозного контура $k I_p$ и выходным напряжением $\dot{U}_n$ близок к 90° . Поэтому влияние дополнительного напряжения на характеристику отсутствует или незначительно, что важно при коротком замыкании в конце защищаемой зоны.

Как показали расчеты, приведенные рассуждения справедливы для всех видов междофазных коротких замыканий, в том случае, если соблюдается условие

$$\frac{x_{\text{лин}}}{x_{\text{с min}}} \geq 3,08,$$

где $x_{\text{лин}}$ сопротивление защищаемой линии; $x_{\text{с min}}$ — сопротивление системы в минимальном режиме работы.

Если данное условие не соблюдается, то необходимо ввести в схему реле элементы, обеспечивающие определенную зависимость напряжения U_n также и от величины напряжения U_p .

При коротком замыкании внутри зоны возбуждение ПДЧ приводит к некоторому увеличению напряжения на нуль-органе, что улучшает действие реле. При замыкании в «мертвой зоне», когда напряжение недостаточно для срабатывания реле, действие его обеспечивается за счет напряжения $\dot{U}_n$, которое достигает своего максимального значения и по направлению приближается к вектору $k I_p$ (см. рис. 2 и 3). Поведение реле в этом случае описывается уравнением (5).

Особенностью работы ПДЧ с реле сопротивления является то, что напряжение питания его изменяется в широких пределах. Область существования устойчивых параметрических колебаний в обычных двухсердечниковых ПДЧ довольно небольшая. Поэтому в описываемом реле применен ПДЧ особой конструкции, в которой весь магнитопровод разделен на два участка, не связанных между собой (рис. 4). Один из них — насыщающийся, представляет собой П-образный сердечник, на крайних стержнях которого расположены обмотки возбуждения w_n . На среднем стержне расположена контурная обмотка w_k и выходная w_v . Эти последние охватывают второй — П-образный сердечник с зазором.

Обмотки возбуждения соединяются последовательно и встречно, контурная обмотка замкнута на конденсатор и образует с ним колебательный контур. За счет встречного соединения обмоток возбуждения энергия передается в контур только вследствие изменения параметра — магнитной проницаемости насыщающегося сердечника.

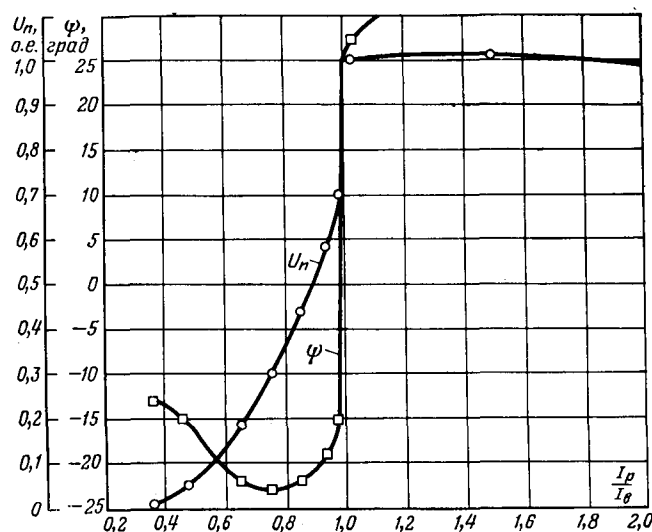


Рис. 3. Кривые изменения величины и фазы выходного напряжения ПДЧ в зависимости от кратности тока.

Ампер-витки обмотки w_n и размеры насыщающегося сердечника подобраны так, что он насыщается уже при минимальном токе, достаточном для возбуждения. Поэтому при дальнейшем увеличении тока магнитная проницаемость этого магнитопровода изменяется между своими максимальным и минимальным значениями. Поскольку магнитное сопротивление ненасыщающегося магнитопровода не изменяется, глубина модуляции магнитной проницаемости эквивалентного магнитопровода, который охвачен контурной обмоткой, остается практически постоянной. Следовательно, и глубина модуляции индуктивности колебательного контура остается постоянной в широком диапазоне изменения напряжения питания. Так как существование колебаний половинной частоты в данном случае обусловлено именно модуляцией индуктивности, то при постоянстве глубины модуляции и прочих неизменных условиях амплитуда выходного напряжения также остается постоянной.

Для исключения влияния э. д. с. трансреактора на фазу возбуждения ПДЧ, особенно при коротком замыкании вблизи места установки защиты, когда управляющее напряжение исчезает, а напряжение трансреактора значительно возрастает, использована специальная выходная обмотка ПДЧ со средней точкой. Э. д. с., наведенные от трансреактора в полубмотках ПДЧ, направлены встречно, и их значения равны, поэтому результирующая э. д. с. на выходной обмотке равна нулю. Равенство э. д. с. на полубмотках обеспечивается резистором R_z , значение которого подбирается равным эквивалентному сопротивлению схемы сравнения.

Минимальное значение дополнительного напряжения, необходимое для срабатывания реле при полном исчезновении напряжения сети, может быть подсчитано по следующему выражению:

$$U_n = \frac{U_{\text{ср. н. о.}} + \Delta U}{k \cos(\varphi_{\text{м. ч.}} + \psi)}, \quad (7)$$

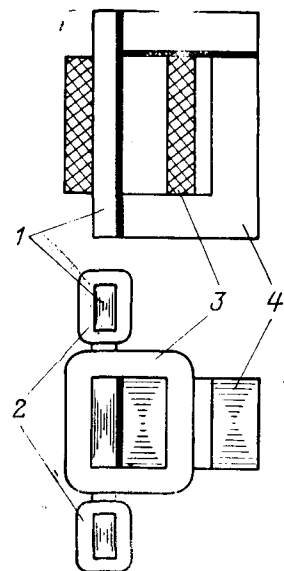


Рис. 4. Конструкция ПДЧ.

1 — насыщающийся сердечник; 2 — обмотка возбуждения; 3 — контурная и выходная обмотки; 4 — сердечник с немагнитным зазором.

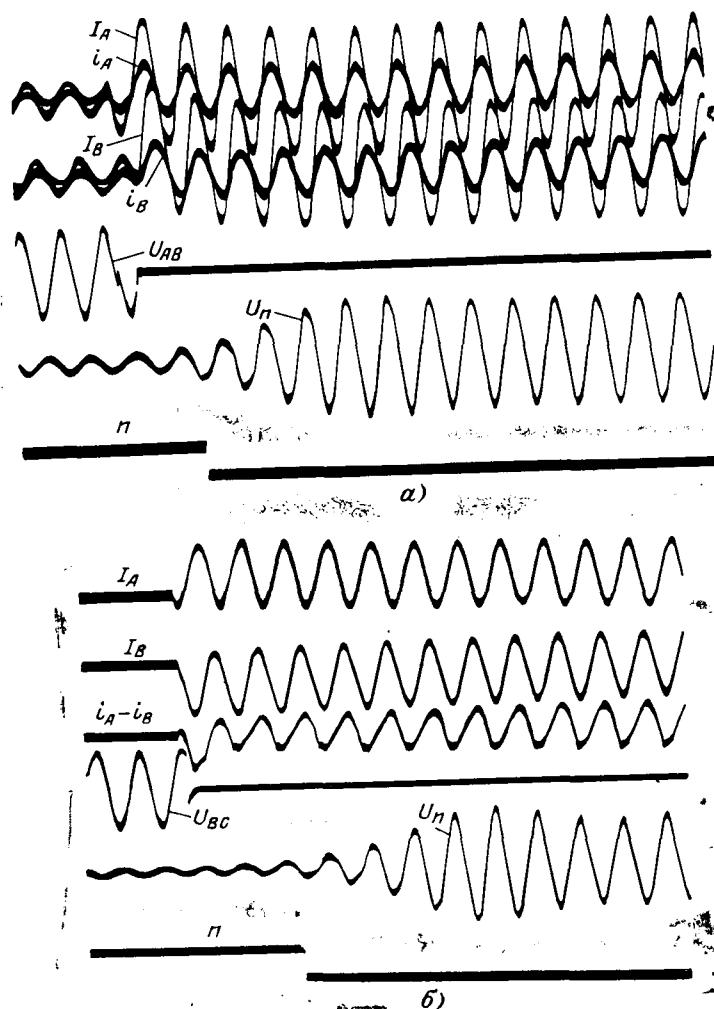


Рис. 5. Осциллограммы, полученные при лабораторных испытаниях реле.

I_A, I_B — первичные фазные токи; i_A, i_B — вторичные фазные токи; $i_A - i_B$ — разность фазных токов; U_{AB} — линейное напряжение; U_n — выходное напряжение ПДЧ; $п$ — ток в цепи контакта реле.

где ΔU — напряжение, определяющее значение сдвига характеристики реле в первый квадрант комплексной плоскости относительно начала координат за счет искусственно вводимого самохода в сторону торможения; $\varphi_{м.ч}$ — угол максимальной чувствительности реле.

Ток, при котором возбуждается ПДЧ, регулируется грубо путем изменения числа витков первичной обмотки трансформатора Tx_1 и плавно — изменением сопротивления резистора R_y .

В качестве нуля-органа использован ноль-индикатор с двухкаскадным усилителем постоянного тока, аналогичный описанному в [Л. 3], однако может быть использовано магнитозлектрическое реле.

Приведем некоторые данные описываемого реле сопротивления, полученные при исследовании его в лабораторных условиях.

1. Токи точной работы при применении полупроводникового нуля-индикатора и числах первичных витков трансформатора Tx_1 , соответствующих минимальным уставкам 1, 0, 5, 0,25 $ом/ф$ равны 1,1 а, 2,3 и 3,2 а соответственно.

2. Потребляемая мощность в цепях напряжения не превышает 6 ватт, в цепях тока — определяется в основном трансформатором Tx_1 и зависит от уставки тока возбуждения ПДЧ. При уставке, например, $I_B = 3I_{ном}$ потребляемая мощность составляет 3,5 ватт, при уставке $I_B = 6I_{ном}$ около 1 ватт.

Для выяснения поведения разработанного реле сопротивления с ПДЧ в реальных условиях были проведены лабораторные исследования на физических моделях.

На физической модели линии с двухсторонним питанием имитировались следующие режимы.

1. Короткое замыкание в зоне действия непосредственно у места установки защиты. При этом имитировались случаи, когда доаварийный ток нагрузки и ток короткого замыкания противоположны по направлению и когда они совпадают.

2. Короткое замыкание «за спиной» защиты также в месте ее установки. В случаях, когда замыкание происходит на нагруженной линии и когда до возникновения замыкания ток нагрузки был равен нулю, что может быть при включении линии на закоротку.

3. Короткое замыкание на границе зоны действия защиты, когда напряжение сети полностью не исчезает, а напряжение на выходе ПДЧ не достигает максимального значения. Изменения значения сопротивления срабатывания в этом случае не наблюдалось.

Кратность тока по отношению к номинальному при коротком замыкании у места установки защиты для используемых в модели трансформаторов тока составляет 15, постоянная времени апериодической составляющей первичной цепи — 0,05 сек. Угол полного сопротивления линии равен 85° .

Испытания по перечисленным выше пунктам и полученные осциллограммы показали, что во всех случаях реле с ПДЧ работает правильно. В качестве примера приведена осциллограмма (рис. 5, а), на которой представлен случай короткого замыкания на линии с двухсторонним питанием, когда доаварийный ток нагрузки противоположен по направлению току короткого замыкания.

Время действия реле во всех опытах не превышало 0,05 сек. Проверка работоспособности реле при коротком замыкании в условиях повышенных погрешностей трансформаторов тока, обусловленных большими кратностями токов замыкания и большими постоянными времени первичной цепи, была проведена на специальной моделирующей установке переходных процессов. Кратность тока короткого замыкания для трансформаторов тока, используемых в модели, задавалась равной 30, постоянная времени апериодической составляющей — 0,3 сек. Погрешность трансформаторов тока при этом достигла в переходном режиме 50%, причем кривая вторичного тока была искажена высшими гармоническими. При многократных опытах, имитирующих трехфазное короткое замыкание с полным исчезновением напряжения и разными углами сопротивления петли короткого замыкания ($0-90^\circ$), реле работало правильно. Таким образом, повышенные погрешности трансформаторов тока не вызывают влияния на работу реле с использованием ПДЧ за исключением того, что несколько повышается время действия реле. Однако, как показали опыты, время действия реле в таких условиях не превышает 0,07 сек.

На рис. 5, б представлена осциллограмма, полученная при испытании на моделирующей установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. М. Основы релейной защиты. М., Госэнергоиздат, 1961.
2. Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М., Госэнергоиздат, 1957.
3. Гаевенко Ю. А. Новые реле защиты на полупроводниках. Киев, «Техника», 1962.
4. Надеждин В. В., Сапронов А. К., Сиротко В. К. Статические реле в релейной защите. «Наука», 1968.

[12.4.1973]



Условия накопления положительного объемного заряда при напряжении высокой частоты в воздушных промежутках различной конфигурации

Инж. ТАРАСОВА Т. Н.

Московский энергетический институт

Снижение разрядных напряжений с ростом частоты в воздушных промежутках как с однородным, так и с неоднородным полем отмечено многими авторами [Л. 1—5]. Причиной снижения в интервале от первой критической частоты $f_{кр1}$ до второй критической частоты $f_{кр2}$ является накопление положительного объемного заряда, усиливающего электрическое поле в промежутке [Л. 4]. При этом, очевидно, должны выполняться два основных положения: создание условий для накопления положительного объемного заряда в промежутке и усиление электрического поля в промежутке полем этого заряда настолько, чтобы снизить разрядное напряжение по сравнению с разрядным напряжением при частотах ниже $f_{кр1}$.

Рассмотрим первое из этих положений, приняв следующие допущения.

1. Положительный объемный заряд в промежутке образуется в результате развития лавин электронов с временного катода. Образование лавин происходит только при условии эффективной ударной ионизации в промежутке ($\alpha_{эфф} > 0$) [Л. 6]. Влияние отрицательных ионов (η -процессы) не учитывается.

2. Электроны практически мгновенно пересекают промежуток. Положительные ионы остаются в промежутке.

Условия накопления заряда в неоднородных полях. Пусть в воздушном промежутке с монотонно изменяющимся электрическим полем («провод — плоскость», «шар — плоскость», коаксиальные цилиндры и др.) максимальная напряженность вдоль центральной силовой линии E_{r0} на электроде с меньшим радиусом кривизны r_0 превышает значение эффективной напряженности $E_{эфф} = pb$, где p — атмосферное давление, атм; b — коэффициент, определяющий пороговое значение E/p , при котором начинается эффективная ионизация. Для воздуха $b = 24$ кв/см. атм [Л. 6]. Вокруг электрода с радиусом r_0 образуется зона ионизации, где $E > E_{эфф}$, в которой при напряжении высокой частоты возможно накопление положительного объемного заряда. При известных законе изменения электрического поля в промежутке и напряженности E_{r0} по методике, изложенной в [Л. 6], можно определить границу r_n зоны ионизации по центральной силовой линии:

$$r_n = r \left(\frac{E_{эфф}}{E_{r0}} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (1)$$

Вывод условия накопления заряда проводим для лавин электронов, стартующих с временного катода — электрода r_0 из точки с E_{r0} в момент максимума напряжения [Л. 3]. Если путь Δ , который положительные ионы проходят за четверть периода, превышает $(r_n - r_0)$, ионы нейтрализуются на электроде с радиусом r_0 . В случае $\Delta < (r_n - r_0)$ ионы остаются в промежутке.

Таким образом, условие накопления положительного объемного заряда в зоне ионизации промежутка с неоднородным электрическим полем можно записать в виде:

$$\frac{r_n - r_0}{2} \geq \Delta. \quad (2)$$

Путь, который проходят положительные ионы за четверть периода, можно определить как

$$\Delta = \int_0^{T/4} v_{cp} dt. \quad (3)$$

Здесь v_{cp} — средняя скорость движения положительных ионов в зоне ионизации:

$$v_{cp} = \frac{1}{r_n - r_0} \int_{r_0}^{r_n} k_+ E(r) dr, \text{ см/сек.} \quad (4)$$

где k_+ — подвижность положительных ионов, $\text{см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$;

$$E(r) = E_{r0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^m. \quad (5)$$

В (5) $E(r)$ напряженность в промежуточной точке центральной силовой линии радиального электрического поля по [Л. 6].

Подставив (5) в (4) и (4) в (3), проинтегрировав по t и по r , получим:

$$\Delta = \frac{k_+ E_{r0} r_0}{2\pi f (r_n - r_0) (1 - m)} \left[\left(\frac{E_{r0}}{E_{эфф}} \right)^{\frac{1-m}{m}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Из условия (2) определяем частоту, соответствующую условиям накопления заряда, в зависимости от напряженности E_{r0} . Для полей с $m \neq 1$ имеем:

$$f = \varphi(E_{r0}) \geq \frac{k_+ E_{r0} \left[\left(\frac{E_{r0}}{E_{эфф}} \right)^{\frac{1-m}{m}} - 1 \right]}{r_0 (1 - m) \pi \left[\left(\frac{E_{r0}}{E_{эфф}} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^2}. \quad (7)$$

Для коаксиальных цилиндров ($m=1$) выражение (7) принимает вид:

$$f \geq \frac{k_+ E_{r0} \ln \frac{E_{r0}}{E_{эфф}}}{\pi r_0 \left[\frac{E_{r0}}{E_{эфф}} - 1 \right]^2}. \quad (8)$$

Для сферического конденсатора ($m=2$)

$$f \geq \frac{k_+ E_{r0} \left[1 - \sqrt{\frac{E_{эфф}}{E_{r0}}} \right]}{\pi r_0 \left[\sqrt{\frac{E_{r0}}{E_{эфф}}} - 1 \right]^2}. \quad (9)$$

Минимальная частота, при которой выполняются условия накопления положительного объемного заряда, определяется при равенстве $E_{r0} = E_0$ (E_0 — разрядная напряженность без накопления заряда):

$$f_0 = \frac{k_+ E_0 \left[\left(\frac{E_0}{E_{эфф}} \right)^{\frac{1-m}{m}} - 1 \right]}{r_0 (1 - m) \pi \left[\left(\frac{E_0}{E_{эфф}} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^2}. \quad (10)$$

Очевидно, что равенство $E_{r0} = E_0$ определяет также верхнюю границу изменения напряженности на электроде r_0 при выполнении условия накопления заряда в случае $f > f_0$. В том случае, когда $E(r)$ превышает $E_{эфф}$ по всей длине промежутка s (квазиоднородное поле по классификации [Л. 6]), зависимость частоты от напряженности на электроде r_0 определяется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} f &= \varphi_1(E_{r0}) \geq \frac{k_+ E_{r0} r_0^m}{\pi / (1 - m) / s (m+1)}, \quad m \neq 1; \\ f &\geq \frac{k_+ E_{r0} \ln \frac{R}{r_0}}{\pi (R - r_0)^2}, \quad m = 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

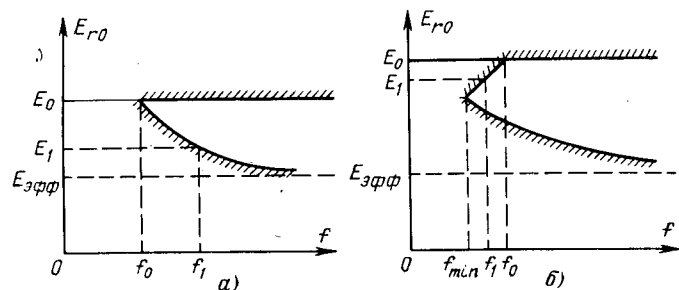


Рис. 1. Области накопления положительного объемного заряда в неоднородном поле.

где R — радиус внешнего цилиндра; r_0 — радиус внутреннего цилиндра.

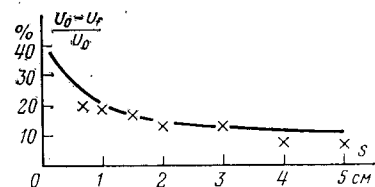
В неоднородном поле, условия накопления заряда в котором определяются по (7), увеличение напряженности E_{r_0} приводит как к расширению зоны ионизации, так и к увеличению средней скорости движения ионов. В квазиоднородном поле (11), поскольку зона ионизации остается постоянной и равной всей длине промежутка, увеличение напряженности приводит лишь к увеличению скорости движения ионов.

На рис. 1,а и б показаны области, где выполняются условия накопления положительного заряда в промежутках с неоднородным электрическим полем. Границы этих областей определены следующим образом:

на рис. 1,а

$$\left. \begin{array}{l} \text{граница 1 — } E_{r_0} = E_0; \\ \text{граница 2 — } f = \varphi(E_{r_0}); \end{array} \right\} \quad (12)$$

Рис. 2. Относительное снижение высокочастотного разрядного напряжения.



на рис. 1,б

$$\left. \begin{array}{l} \text{граница 1 — } E_{r_0} = E_0; \\ \text{граница 2 — } f = \varphi_1(E_{r_0}) \text{ при} \\ E_{r_0} \geq E_{эфф} \left(\frac{s+r_0}{r_0} \right)^m; \\ \text{граница 3 — } f = \varphi(E_{r_0}) \text{ при} \\ E_{r_0} < E_{эфф} \left(\frac{s+r}{r_0} \right)^m. \end{array} \right\} \quad (12a)$$

В промежутках, для которых область накопления заряда определяется условием (12) и показана на рис. 1,а, при некоторой частоте $f_1 > f_0$ накопление положительного заряда может происходить в случае $E_1 \leq E_{r_0} \leq E_0$.

В промежутках, область накопления заряда для которых определяется условием (12а) и показана на рис. 1,б, можно выделить два диапазона частот: от f_{min} до f_0 и выше f_0 .

В первом диапазоне при увеличении напряженности от $E_{r_0} = E_1$, определяемой по (7) до $E_{r_0} = E_2$, определяемой по (11), вероятность накопления заряда мала, а при $E_{r_0} = E_2$ заряд полностью нейтрализуется на электродах. При $f > f_0$ выполняется условие, указанное для рис. 1,а.

Зная коэффициент неоднородности электрического поля k_H рассматриваемых промежутков, можно построить вольт-

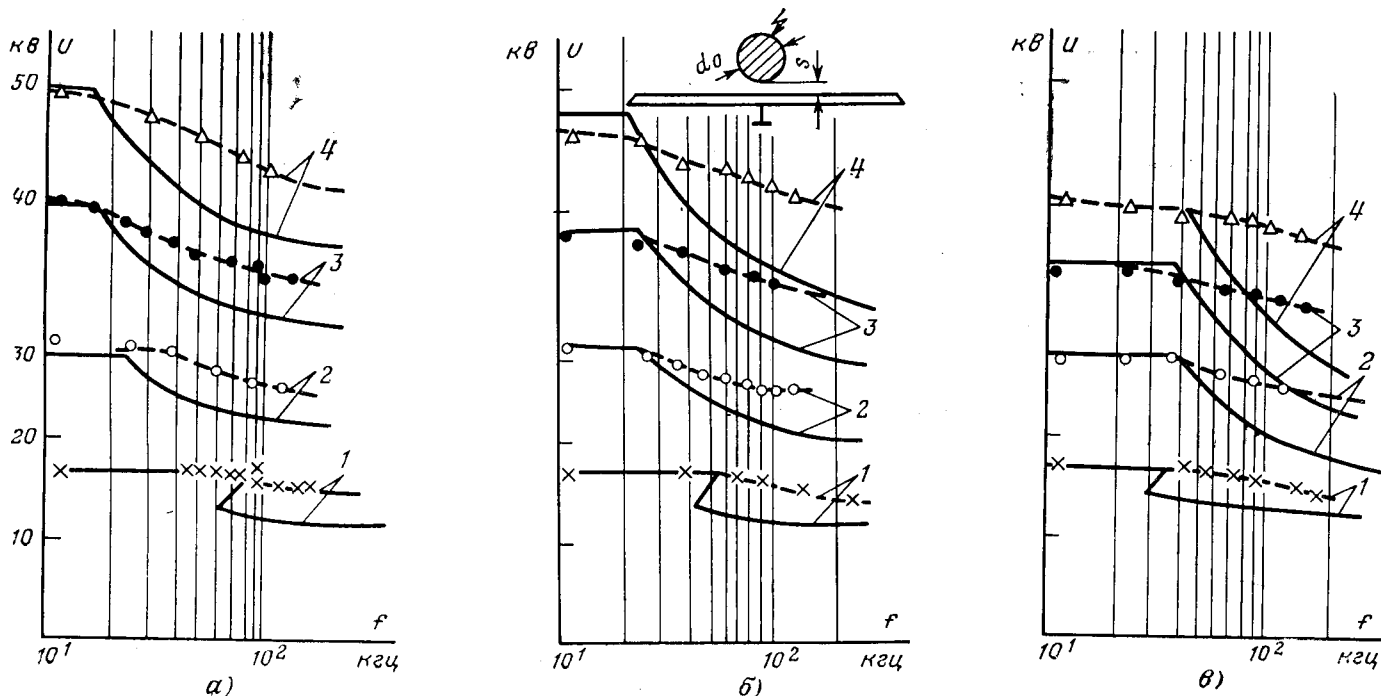


Рис. 3. Вольт-частотные характеристики воздушных промежутков «цилиндр—плоскость».

а — $d_0=5$ см; 1 — $s=0,5$ см, $k_H=1,07$; 2 — $s=1$ см, $k_H=1,14$; 3 — $s=1,5$ см, $k_H=1,19$; 4 — $s=2$ см, $k_H=1,25$.
б — $d_0=4$ см; 1 — $s=0,5$ см, $k_H=1,11$; 2 — $s=1,0$ см, $k_H=1,21$; 3 — $s=1,5$ см, $k_H=1,33$; 4 — $s=2$ см, $k_H=1,43$.
в — $d_0=1,4$ см; 1 — $s=0,5$ см, $k_H=1,21$; 2 — $s=1,0$ см, $k_H=1,41$; 3 — $s=1,5$ см, $k_H=1,64$; 4 — $s=2,0$ см, $k_H=1,86$.

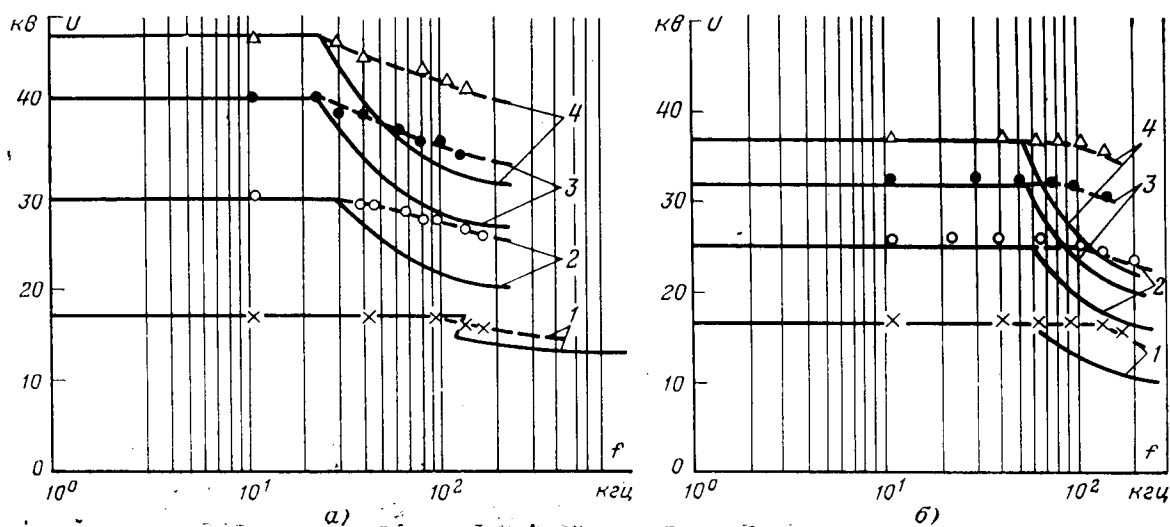
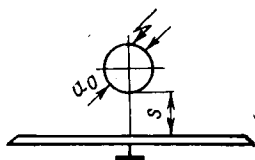


Рис. 4. Вольт-частотные характеристики промежутков «шар — плоскость».

$\alpha - d_0 = 5$ см; 1 — $s = 0,5$ см, $k_H = 1,08$; 2 — $s = 1,0$ см, $k_H = 1,26$; 3 — $s = 1,5$ см, $k_H = 1,44$; 4 — $s = 2$ см, $k_H = 1,62$.
 $b - d_0 = 2,4$ см; 1 — $s = 0,5$ см, $k_H = 1,27$; 2 — $s = 1,0$ см, $k_H = 1,65$; 3 — $s = 1,5$ см, $k_H = 2,03$; 4 — $s = 2$ см, $k_H = 2,4$.

частотную характеристику промежутка, рассчитанную из условия накопления заряда:

$$f = \frac{\varphi(E_{r_0}) s}{k_H} = \psi(U).$$

По этой характеристике можно оценить предельное минимальное значение высокочастотного разрядного напряжения.

Условие накопления заряда в однородном поле. Если в (5) принять $m = 0$, то $E(r) = E_{r_0} = E$, т. е. поле становится однородным. Скорость движения положительных ионов $v = k_+ E = \text{const}$. Условие накопления заряда в промежутке с однородным полем принимает вид:

$$f \geq \frac{k_+ E}{\pi s}. \quad (13)$$

Исходя из модели образования положительного объемного заряда и учитывая выражение (13), можно построить области, где сочетания значений E , f , s и p обеспечивают выполнение условий накопления заряда в однородном поле. Границы этих областей определены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} E = E_0 = pb + a \sqrt{\frac{p}{s}}; \\ f = \frac{k_+ (p) E}{\pi s}; \\ E = E_{\text{эфф}} = pb. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

При $f > f_0$ увеличение напряженности приводит к росту объемного заряда. Накапливающийся заряд вызывает снижение разрядных напряжений. Величина высокочастотного разрядного напряжения может находиться в пределах от $U_0 = E_0 s$ до $U_{\text{эфф}} = E_{\text{эфф}} s$. Известно, что при увеличении расстояния между электродами разрядная напряженность в однородном поле стремится к величине 24 кВ/см в воздухе при нормаль-

ных атмосферных условиях. Для воздуха амплитудное значение разрядной напряженности определяется из выражения:

$$E_0 = 24p + 6,4 \sqrt{\frac{p}{s}}. \quad (15)$$

Пусть $\Delta E = E_0 - E_{\text{эфф}}$, тогда

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{6,4 \sqrt{\frac{p}{s}}}{24p + 6,4 \sqrt{\frac{p}{s}}}. \quad (16)$$

Очевидно, что предельное относительное снижение высокочастотного разрядного напряжения при $f \gg f_0$

$$\Delta U_f = \frac{U_0 - U_f}{U_0}$$

соответствует $\Delta E/E_0$. На рис. 2 по формуле (16) построена зависимость относительного снижения высокочастотного разрядного напряжения от расстояния между электродами. Наблюдается хорошее совпадение этой зависимости с экспериментальными данными [Л. 4].

Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей. Для воздушных промежутков «цилиндр — плоскость», «шар — плоскость» и коаксиальных цилиндров были проведены расчеты зависимостей $U_{r_0} = \psi(f)$, устанавливающие связь между напряжением и частотой для нижней границы зоны накопления заряда. Коэффициент подвижности положительных ионов был принят постоянным и равным $2,6 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ [Л. 3]. Коэффициент неоднородности электрических полей рассмотренных промежутков не превышал 2.

Для оценки результатов расчетов для тех же промежутков были проведены эксперименты по определению разрядных напряжений в диапазоне частот $50 \text{ гц} - 200 \text{ кГц}$ при нормальных атмосферных условиях. Во всех исследовавшихся промежутках при повышении напряжения сразу происходил пробой, а корона отсутствовала.

На рис. 3 представлены результаты измерений и расчетов для системы «цилиндр — плоскость», а на рис. 4 и 5

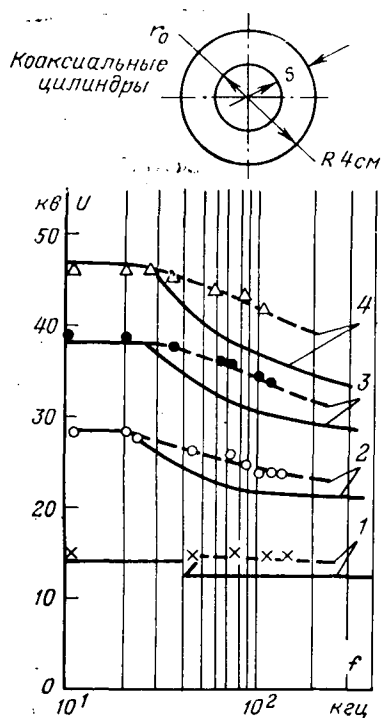


Рис. 5. Вольт-частотные характеристики промежутка коаксиальных цилиндров ($R=4$ см).

— расчет; --- эксперимент.
1 — $s=0,5$ см, $k_n=1,07$; 2 — $s=1,0$ см, $k_n=1,15$; 3 — $s=1,5$ см, $k_n=1,265$; 4 — $s=2,0$ см, $k_n=1,45$.

построены аналогичные кривые для промежутка «шар — плоскость» и коаксиальных цилиндров.

Сопоставление измеренных и расчетных характеристик показывает, что для промежутков, коэффициент неоднородности которых не превосходит 1,4, высокочастотное разрядное напряжение несколько превышает соответствующее выполнению условий накопления заряда. Например, при $f=100$ кГц для промежутков «цилиндр — плоскость» при $d_0=5$; 3; 2 см и для коаксиальных

цилиндров разница составляет 8—17%. Меньшее значение относится к меньшему межэлектродному расстоянию. В случае промежутков с коэффициентом неоднородности 1,4—2 расхождение между U_{r_0} и U_f значительное и в некоторых случаях превосходит 30%.

Необходимо помнить, что приведенный расчет учитывает только выполнение условий для накопления заряда и дает предельные минимальные значения разрядных напряжений.

Результаты экспериментов, приведенные в [Л. 7], показали, что увеличение частоты со 150 до 1500 кГц практически не влияет на величину разрядного напряжения таких промежутков.

Следовательно, величины разрядных напряжений, приведенные на рис. 4—6 (кривые 1, 2, 3), близки к установившимся минимальным значениям. Учитывая, что величина U_{r_0} тоже близка к пределу (при $f > f_0$ $U_{r_0} \rightarrow U_{эфф} = k_n E_{эфф}$), можно считать, что указанное расхождение в данной системе электродов является максимально возможным. Увеличение разницы между U_{r_0} и U_f с увеличением степени неоднородности электрического поля (рис. 4—6 при $k_n=1,4$ —2) связано с уменьшением зоны ионизации, в результате чего затрудняется образование объемного заряда. При расстоянии между электродами $s=0,5$ см (рис. 4, 4а и 5) увеличение напряжения приводит к тому, что $\alpha_{эфф} > 0$ по всей длине промежутка. Граница зоны накопления заряда определяется по (11) (см. рис. 1б). Полная граница становится ломаной линией. Как показано выше, в экспериментальной вольт-частотной характеристике резких перегибов не наблюдается.

Рис. 6. Зависимость частоты f_0 от расстояния между электродами в промежутке «цилиндр — плоскость».

1 — однородное поле; 2 — $d_0=5$ см; 3 — $d_0=3$ см; 4 — $d_0=2$ см; 5 — $d_0=1,4$ см; 6 — $d_0=0,8$ см.

На рис. 6 построены на основании расчетных величин зависимости f_0 от s для промежутка «цилиндр — плоскость». Для цилиндров большого радиуса, когда

$s < \frac{d_0}{2}$, поле близко к однородному, и с увеличением

расстояния между электродами значение f_0 падает, как и в случае однородного поля. Уменьшение радиуса кривизны электрода приводит к росту f_0 . Когда $s > \frac{d_0}{2}$,

f_0 практически не зависит от межэлектродного расстояния и определяется только радиусом кривизны электродов.

Сопоставление частоты f_0 и экспериментально определенной критической частоты $f_{кр}$, при которой начинается снижение разрядного напряжения, показывает, что для промежутков с коэффициентом неоднородности до 1,6 значения f_0 и $f_{кр}$ практически совпадают. При увеличении коэффициента неоднородности расхождение между f_0 и $f_{кр}$ увеличивается по тем же причинам, что и расхождение между U_{r_0} и U_f .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fatechand R. R. T. The electrical breakdown of gaseous dielectrics at high frequencies. Proc. Inst. Electr. Eng. s. 104, 1954, p. 489.
2. Bocher H. Die Durchschlagsenkung bei Hochfrequenz. Arch für Electrotechn. 1937, Bd 31, s. 166.
3. Жуков А. А. Формирование положительного объемного заряда в электрическом поле высокой частоты в воздухе. Труды научного объединения физико-математических факультетов педагогических институтов Дальнего Востока, 1964, т. 4.
4. Электрические разряды в воздухе при напряжении высокой частоты. М., «Энергия», 1969. Авт.: М. А. Аронов, Е. С. Колечинский, В. П. Ларионов и др.
5. Прокофьев А. М., Кабардин О. Ф., Куду И. Ф. Исследование начальных стадий высокочастотного разряда с острия в воздухе при атмосферном давлении. Изв. АН СССР, серия физическая, 1959, № 8, т. XXIII.
6. Разевиг Д. В. Начальные напряжения газового разряда в электрических полях различной конфигурации. — «Электричество», 1970, № 8.
7. Колечинский Е. С., Тарасова Т. Н. Разрядные характеристики изоляционных промежутков радиоустройств в диапазоне длинных и средних волн. — «Электросвязь», 1972, № 9.

[3.5.1973]



Работники народного хозяйства! Настоячиво овладевайте экономическими знаниями, современными методами хозяйствования и управления! Смелее внедряйте в производство научную организацию труда, передовой опыт, новейшие достижения науки и техники!

(Из Призывов ЦК КПСС к 1 Мая 1974 года)

Термокомпенсация цепей RC

Инж. ЕСЕНИН В. В.

Москва

Изменение температуры вызывает отклонение постоянной времени электрической цепи RC, что существенно сказывается на динамических характеристиках устройств.

В [Л. 1—3] рассматриваются вопросы термокомпенсации отдельных элементов цепи. Ниже предлагается метод термокомпенсации всей цепи RC с помощью одного элемента (сопротивления или конденсатора), что позволяет не только компенсировать изменение постоянной времени цепи при колебаниях температуры, но и в широких пределах влиять на закон этого изменения.

Выражение для постоянной времени цепи RC с термокомпенсирующим сопротивлением R_k (рис. 1) имеет вид:

$$\tau(\theta) = [(R_1 + R_1\alpha_1\theta) + (R_k + \alpha_k\theta)](C_1 + C_1\alpha_2\theta), \quad (1)$$

где α_1 , α_2 , α_k — соответственно температурные коэффициенты сопротивления R_1 , конденсатора C_1 и термокомпенсирующего сопротивления R_k ; θ — отклонение температуры от нормальной.

Обозначив $R_k + R_1 = R_2$, из (1) получим выражение для постоянной времени цепи:

$$\tau(\theta) = R_2 C_1 + C_1 \theta [R_2(\alpha_1 + \alpha_2) + R_k(\alpha_k - \alpha_1)] + C_1 \theta^2 \alpha_2 [R_2 \alpha_1 - R_k(\alpha_1 - \alpha_k)]. \quad (2)$$

Обозначим соответственно слагаемые в (2) через $\tau(0)$, $\Delta\tau_1(\theta)$, $\Delta\tau_2(\theta)$. Составляющая $\Delta\tau_1(\theta)$ изменяется по линейному закону от θ , а $\Delta\tau_2(\theta)$ — по квадратичной зависимости. Общая ошибка постоянной времени $\Delta\tau(\theta)$ в зависимости от знака θ может равняться сумме или разности составляющих $\Delta\tau_1(\theta)$ и $\Delta\tau_2(\theta)$.

Рассмотрим случай, когда $\Delta\tau_1(\theta) = 0$, откуда находим выражение для определения величины термокомпенсирующего сопротивления:

$$R_k = \frac{R_2(\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_1 - \alpha_k}. \quad (3)$$

Примем, что $R_2 \geq R_k \geq 1$, тогда с учетом (3) получим неравенства, позволяющие определять диапазон значений α_k при выборе сопротивления R_k :

$$\left. \begin{aligned} -\alpha_2 \geq \alpha_k > \alpha_1 - R_2(\alpha_1 + \alpha_2); \\ -\alpha_2 \leq \alpha_k \leq \alpha_1 - R_2(\alpha_1 + \alpha_2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В зависимости от номинальных значений и знака исходных величин α_1 , α_2 , R_2 будет справедливо одно из неравенств. В этом случае выражение для общей ошибки постоянной времени с учетом (2) и (3) имеет вид:

$$\Delta\tau(\theta) = -C_1 R_2 \alpha_2^2 \theta^2. \quad (5)$$

Из (5) видно, что предельная минимальная ошибка определяется значением α_2 .

Таким образом, имея исходные значения C_1 , α_1 , α_2 , R_2 и подбирая термокомпенсирующий элемент с α_k согласно (6), можно определить величину R_k по (3).

Компенсация составляющей $\Delta\tau_1(\theta)$ позволяет снизить общую относительную ошибку более чем на порядок. Следует заметить, что рассмотренный случай сводится к подбору общего ТК сопротивлений, равного по величине и противоположного по знаку ТК конденсатора.

При $\Delta\tau_2(\theta) = 0$ выражение для определения величины термокомпенсирующего элемента и неравенства, позволяющие определять диапазон значений α_k при выборе резистора R_k , соответственно примут вид:

$$R_k = \frac{R_2 \alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_k}; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \geq \alpha_k > -\alpha_1(R_2 - 1); \\ 0 \leq \alpha_k \leq -\alpha_1(R_2 - 1). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Выражение для общей ошибки постоянной времени с учетом (2) и (6) получим в виде:

$$\Delta\tau(\theta) = C_1 R_2 \alpha_2 \theta, \quad (8)$$

т. е. $\Delta\tau(\theta)$ в $\alpha_2\theta$ раз больше, чем в первом случае (5).

Функция $\Delta\tau(\theta)$ — линейная, что может представлять интерес при реализации в устройствах метода самокомпенсации [Л. 4].

Рассмотрим случай, когда общая ошибка постоянной времени может быть снижена за счет взаимокompенсации составляющих $\Delta\tau_1(\theta)$ и $\Delta\tau_2(\theta)$.

Из рис. 2 видно, что предельная ошибка $\Delta\tau(\theta)$ на интервале $(0, \theta_3)$ будет минимальной в том случае, если она принимает равные по абсолютной величине и противоположные по знаку значения, т. е. $\Delta\tau(\theta_1) = -\Delta\tau(\theta_3)$. Требуется определить значение R_k , при котором $\Delta\tau(\theta)$ удовлетворяет вышеуказанным требованиям.

Выражение для общей ошибки постоянной времени согласно (2) имеет вид:

$$\Delta\tau(\theta) = C_1 \theta [R_2(\alpha_1 + \alpha_2) + R_k(\alpha_k - \alpha_1) + \theta \alpha_2 \{R_2 \alpha_1 - R_k(\alpha_1 - \alpha_k)\}]. \quad (9)$$

Как следует из рис. 2, выражение для определения значения R_k можно найти из (9) при $\theta = \theta_2 = 2\theta_1$:

$$R_k = \frac{R_2(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 \theta_2)}{\alpha_1 - \alpha_k - \alpha_k \alpha_2 \theta_2 + \alpha_1 \alpha_2 \theta_2}. \quad (10)$$

Значения θ_1 , θ_2 и R_k определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= 2\theta_1; \\ \frac{d\Delta\tau(\theta_1)}{d\theta_1} &= 0; \\ \Delta\tau(\theta_1) + \Delta\tau(\theta_3) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из (11) имеем:

$$\theta_2 = \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \theta_3. \quad (12)$$

Тогда из (9) с учетом (10) и (12) получим выражения:

$$\Delta\tau(\theta) = -C_1 R_2 \alpha_2^2 \theta \frac{\left(\theta - \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \theta_3\right)}{1 + \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \theta_3 \alpha_2}; \quad (13)$$

$$\Delta\tau(\theta_3) \approx -0,17 C_1 R_2 \alpha_2^2 \theta_3^2. \quad (14)$$

Предельная минимальная ошибка получается примерно в 5 раз меньше, чем в первом случае (5).

Из (10) с учетом (12) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{-\alpha_2}{1 + \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}}} &\geq \alpha_k \geq - \\ &\frac{R_2 \left(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \right) -}{1 + \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \theta_3 \alpha_2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{-\alpha_1 - \alpha_1 \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}}}{+ \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}}}; \\ \frac{-\alpha_2}{1 + \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}}} &\leq \alpha_k \leq - \\ &\frac{R_2 \left(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \right) -}{1 + \frac{2}{1 + \sqrt{2}} \theta_3 \alpha_2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{-\alpha_1 - \alpha_1 \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}}}{+ \alpha_2 \theta_3 \frac{2}{1 + \sqrt{2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

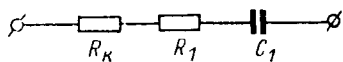


Рис. 1. Цепь RC с термокомпенсирующим резистором.

Данный случай термокомпенсации может найти применение в устройствах, эксплуатирующихся при отклонениях температуры одного знака.

Термокомпенсацию цепи RC можно осуществить и с помощью термокомпенсирующего конденсатора, подключаемого параллельно основному. При этом будут справедливы все соотношения, приведенные выше, при соответствующей подстановке значений элементов и их ТК. (Однако термокомпенсация цепей конденсатором ограничивается по конструктивным соображениям.)

Как уже отмечалось выше, термокомпенсация цепей имеет существенное ограничение из-за отсутствия широкого выбора элементов с различными ТК. Поэтому рассмотрим возможность использования элемента с заданным номинальным значением и ТК.

Выражение для ТК цепи, состоящей из двух последовательно включенных сопротивлений R_1 и R_2 , имеет вид:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (16)$$

где α_1, α_2 — ТК сопротивлений R_1 и R_2 .

Из (16) видно, что α_0 может принимать все промежуточные значения интервала (α_1, α_2) при изменении R_1 и R_2 от 0 до R_0 , где

$$R_0 = R_1 + R_2 = \text{const.} \quad (17)$$

С учетом (16) и (17) запишем соотношения для расчета элемента с заданными значениями α_0, R_0 :

$$\left. \begin{aligned} R_0(\alpha_0 - \alpha_1) + \alpha_1 &\geq \alpha_2 \geq \alpha_0; \\ R_0(\alpha_0 - \alpha_1) + \alpha_1 &\leq \alpha_2 \leq \alpha_0; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{R_0(\alpha_0 - \alpha_1)}{\alpha_2 - \alpha_1}; \quad (19)$$

$$R_1 = R_0 - R_2. \quad (20)$$

При расчете вначале выбираем сопротивление с ТК, равным α_1 , затем по (18) находим диапазон значений α_2 второго сопротивления и определяем его тип, после чего по выбранным

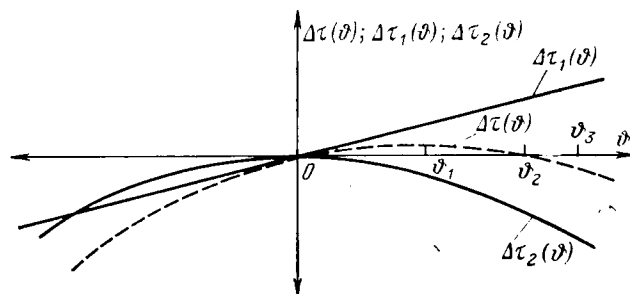


Рис. 2. Функциональные зависимости ошибки постоянной времени и составляющих от изменения температуры.

элементам с ТК α_1 и α_2 , удовлетворяющими одному из неравенств (18), находим по (19) и (20) значения R_2 и R_1 .

При термокомпенсации цепи с $\tau = 100$ мсек, состоящей из сопротивления типа УЛИ с ТК, равным $-5 \cdot 10^{-4}$ 1/град, конденсатора 10 мкф типа МПГО с температурным коэффициентом $-1,5 \cdot 10^{-4}$ 1/град и компенсирующего сопротивления из никелевой проволоки с ТК, равным $+6,1 \cdot 10^{-3}$ 1/град, относительная ошибка при отклонении температуры на $\pm 80^\circ\text{C}$ составила 0,24% и без термокомпенсирующего резистора — 5,24%. В расчете резистора типа УЛИ учитывалось стандартное значение номинала. Таким образом, вводя термокомпенсирующий резистор в цепь RC, можно существенно снижать ошибку постоянной времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В. А., Харазов К. И. Релейные генераторы импульсов авиационной электроавтоматики. М., «Машиностроение», 1969. 148 с.
2. Малаховский Е. И. Исследование стабильности реле времени с электрическим контуром RC. — «Электричество» 1965, № 8.
3. Матвиенко Г. Р. Термокомпенсация нестабильности частотно-избирательных цепей. М., «Машиностроение», 1970. 56 с.
4. Тищенко Н. М. Стабильность магнитных усилителей. М.—Л., «Энергия», 1964. 320 с.

[4.7.1973]

По страницам технических журналов¹

Производство и потребление электроэнергии в странах ЕЭС. — «Polytechn. tijdschr.», 1973, E 28, № 14, с. 451. Электроэнергетика стран ЕЭС в 1970—1972 гг. характеризовалась данными, приведенными в табл. 1, где указано потребление электроэнергии (в млрд. кВт·ч), включая потери в сетях. В покрытии графика нагрузки в странах ЕЭС заметно возрастает доля выработки АЭС (см. табл. 2).

Электроснабжение Швеции в 1975—1990 гг. — «VGB Kraftwerkstechn.», 1973, 53, № 9, с. 592—594. До недавнего времени потребности в электроэнергии Швеции покрывались в основном за счет производства ее на ГЭС. До 1967 г. на ГЭС производили 92% общей выработки электроэнергии. В 1972 г. доля производства ГЭС уменьшилась до 76%. Учитывая, что в Швеции осталось ограниченное количество незарегулированных рек, отмечается необходимость широкого строительства ТЭС и АЭС. Государственное энергетическое управление Швеции запланировало на перспективу преимущественное строительство АЭС. Дополнительно пик нагрузки будет покрываться ГТЭС и КЭС. Исследование различных категорий потре-

бителей показало, что общая годовая продолжительность использования сохранится неизменной, равной 5200 ч. Для покрытия пика нагрузки потребуется 19 400 Мвт в 1975 г. и

Таблица 1

Страна	1970 г.	1971 г.	1972 г.	Прирост, %	
				1971/1970 гг.	1972/1971 гг.
ФРГ	232,6	246,9	266,4	+6,2	+7,9
Франция	140,0	147,4	157,4	+5,3	+6,8
Италия	115,5	120,0	127,8	+3,9	+6,5
Нидерланды	38,5	41,7	45,8	+8,1	+9,9
Бельгия	29,3	31,1	34,6	+5,9	+11,4
Люксембург	2,52	2,67	2,85	+5,9	+6,4
Великобритания	230,9	237,5	243,7	+2,9	+2,6
Ирландия	5,5	6,0	6,5	+9,9	+7,0
Дания	14,7	15,6	17,1	+6,2	+9,8
Всего	809,5	848,9	902,1	+4,8	+6,3

¹ В данном номере дается обзор ряда материалов 1—3 выпусков за 1974 г. РЖЭ ВИНТИ АН СССР «Электрические станции, сети и системы».

Таблица 2

Год	Суммарная выработка, 10 ⁹ кВт·ч	Выработка по типам электростанций, 10 ⁹ кВт·ч			
		ГЭС	геотермические	АЭС	ТЭС
1971	850	108,3	2,5	41,8	697,9
1972	905,6	111,3	2,4	51,8	740,0
Прирост, %	+6,5	+2,7	-3,1	+24,0	+6,0

4800 Мвт в 1990 г. Рекомендованная программа строительства электростанций приведена в табл. 3.

Современное состояние и перспективы развития электроэнергетики Японии. — «Кагаку когё, Chem. Ind.» (Jap.), 1973, 24, № 7, с. 870—875; «Лиз у fuerza», 1973, 32, № 384, с. 5—15. Прослежена динамика роста потребления электроэнергии в Японии с 1951 по 1972 гг.; в последние годы среднегодовой прирост потребления электроэнергии составлял около 10%. С 1951 по 1971 гг. потребление электроэнергии увеличилось в 9,4 раза и достигло 345,8 млрд. кВт·ч. Отмечается, что на конец марта 1972 г. установленная мощность электростанций страны составляла 76 480 Мвт, из них на ТЭС — 54 968, ГЭС — 20 176 и АЭС — 1336 Мвт. Максимум нагрузки электроэнергетических систем Японии приходился на конец летнего периода и составлял в 1970, 1971 и 1972 гг. соответственно 49 216, 53 272 и 59 230 Мвт. Прогнозируется увеличение производства электроэнергии до 810—880 млрд. кВт·ч в 1990 г. и до 2200—2600 млрд. кВт·ч в 2000 г. Дальнейший рост производства электроэнергии будет характеризоваться увеличением доли АЭС до 27% в 1980 г., до 39% в 1990 г. и до 50% в 2000 г. при снижении доли ТЭС и при сохранении доли ГЭС (20%), что связано с растущими требованиями защиты биосферы, так и недостатком топлива. В отношении развития атомной энергетики упор делается на быстрые реакторы-размножители и многоцелевые газоохлаждаемые ядерные реакторы. Рассмотрены проблемы реализации электроэнергии и построения тарифов для различных категорий потребителей. Приведены также данные об электроэнергетическом потенциале о. Окинава.

Перспективы развития электроэнергетики Австралии. — «Elec. Eng.», 1973, 50, № 8, с. 20—23. С 1961 г. электропотребление Австралии возросло в среднем на 9%, а количество потребителей на 3,3% в год. К 2000 г. электропотребление 11 млн. потребителей составит около 600 млрд. кВт·ч, что в 10 раз превысит выработку всех электростанций Австралии в настоящее время. В 1953 г. максимальная мощность генератора электроэнергетической системы Нового Южного Уэльса составляла 50 Мвт, а в 1974 г. около 30% установленной мощности электростанций будет состоять из генераторов 500 Мвт и выше. Основную мощность ЭС намечается ввести на ТЭС и АЭС, причем для ТЭС будет широко использоваться газ и мазут. Считается, что к 2000 г. крупными генераторами будет вырабатываться около 82% электроэнергии Австралии. Отмечаются трудности с покрытием графика нагрузки электроэнергетических систем, которые усложняются при укрупнении генераторов. Рекомендована политика создания потребителей-регуляторов, обеспечивающих диспетчерскому персоналу удобства в ведении режима.

Исследовательская программа США в области ультравысоких напряжений. — «Edison Elec. Inst. Bull.», 1973, 41, № 4, с. 190—192. Исследования по программе УВН в США были начаты в 1967 г. Испытаны провода однофазной ВЛ, расщепленные на 4, 6, 8 и 12 составляющих. В 1970 г. были начаты исследования электрической прочности изоляции воздушных промежутков электропередачи УВН, а затем подстанционной изоляции. Были получены 50%-ные разрядные характеристики фазы относительно земли до 2000 кВ и между фазами до 3800 кВ. Обнаружено, что на электрическую прочность горизонтальных гирлянд существенно влияют размеры экранов и заземленных конструкций. Естественный дождь незначительно снижает прочность изоляторов для УВН при внутренних (коммутационных) перенапряжениях. Сообщается, что разрядные характеристики междуфазовых промежутков определены до длины 12,8 м. На период 1974—1976 гг. планируется испытать

Таблица 3

Тип электростанции	Установленная мощность, Мвт		Производство электроэнергии, ТВт·ч		Продолжительность использования, ч	
	1975 г.	1990 г.	1975 г.	1990 г.	1975 г.	1990 г.
ГЭС	12 840	16 200	59	65	4600	4000
АЭС	3180	23 600	14	150	4400	6350
ТЭС	2480	4900	111	20	4450	4100
КЭС	3360	5500	15,5	14	4600	2550
ГТЭС	1710	7600	0,5	1	300	130
Итого	23 570	57 800	100	250		
Пик нагрузки	19 400	48 000				
Резервная мощность	4170	9800				
	(21,5 %)	(20,5 %)				

ние трехфазной специальной ВЛ длиной 800 м при изменении линейного напряжения от 600 до 1500 кВ; специальные траверсы позволяют менять высоту подвески проводов и расстояния между фазами.

Линии электропередачи 275 и 400 кВ в Великобритании. — «Electron. and Power», 1973, 19, № 15, с. 352—356. Магистральными связями между электростанциями Великобритании являются ВЛ 275 и 400 кВ. При сооружении ВЛ Главное энергетическое управление Великобритании (CEGB) стремится при выборе трасс ВЛ обходить живописные места или переходить на сооружение кабельных линий, однако последние дороги. Например, кабельные линии 132 кВ в 10 раз, а 400 кВ в 15 раз дороже аналогичных ВЛ. Сделан вывод о том, что в настоящее время переход на кабельные линии нецелесообразен по технико-экономическим соображениям. На всех ВЛ 132, 275 и 400 кВ применяются сталеалюминиевые провода двух марок сечением 175 и 400 мм², на ВЛ 132 кВ — одиночные и с расщеплением фазы на два провода, на 275 кВ — с расщеплением на два провода, на ВЛ 400 кВ — с расщеплением на два и четыре провода 400 мм². Переход к расщепленным проводам вызвал усиление пляски проводов с амплитудами до 8 м, однако при наличии АПВ прекращение питания из-за пляски наблюдается редко. Срок службы провода ВЛ составляет около 30 лет, в сельской местности более 40 лет. В районах загрязнения изоляторов применяются грязеустойчивые изоляторы с отношением длины пути утечки и строительной высоты 3:1. Все ВЛ сооружаются на двухцепных оцинкованных опорах болтовой конструкции с одним грозозащитным тросом. Полная высота опор 275 кВ 41,5 м, 400 кВ — 50,3 м. При использовании изолирующих траверс высоту опор можно уменьшить на 9 м.

Исследование загрязнения изоляторов УВН. — «IEEE Trans. Power Appar. and Syst.», 1973, 92, № 3, с. 1111—1117. Приведены результаты испытаний в туманной камере при искусственном загрязнении одиночных вертикальных гирлянд длиной до 8,5 м из стандартных изоляторов и V-образных гирлянд до 7,2 м из изоляторов трех типов. Испытания изоляторов V-образных гирлянд выполнены в туманной камере диаметром 24 и высотой 25,5 м с имитацией опоры и расщепленного провода. Получена линейная зависимость разрядных напряжений от длины гирлянды. Характеристики противотуманных изоляторов большого диаметра намного лучше, чем стандартных изоляторов: V-образная гирлянда стандартных изоляторов длиной 7 м эквивалентна V-образной гирлянде противотуманных изоляторов длиной 4,9 м. Приведены рекомендации, основанные на статистическом методе, по числу изоляторов в гирлянде ВЛ 525, 750 и 1100 кВ для различных условий загрязнения. Отмечается, что для ВЛ 1100 кВ независимо от условий загрязнения рекомендовано использовать противотуманные изоляторы. На ВЛ 1100 кВ длина V-образной гирлянды противотуманных изоляторов должна составлять 7,0; 8,5 и 10,1 м соответственно для очень легких, легких и умеренных загрязнений.

Измерение окислителей вблизи действующих ВЛ 765 кВ. — «IEEE Trans. Power Appar. and Syst.», 1973, 92, № 3, с. 1141—1148. Коронный разряд на ВЛ СВН приводит к образованию озона и окислов азота, загрязняющих атмосферу вблизи ВЛ. Рассмотрены результаты систематических измерений концентрации озона и окислов азота при различных погодных условиях. Измерения были выполнены в 20 раз-

личных местах как на уровне земли, так и на высоте расположения проводов ВЛ. Обнаружено небольшое повышение концентрации озона при увеличении высоты местности над уровнем моря, однако, только в ясные дни; оно не связано с присутствием ВЛ. Таким образом, ВЛ класса 765 кВ не создают опасных для биосферы концентраций окислителей при любых погодных условиях. Отмечается, что вывод, по-видимому, справедлив и для ВЛ более высоких классов напряжений.

Сверхвысоковольтные распорки, выполняющие роль гасителей вибраций. — «Elec. World», 1973, 180, № 4, с. 123.

Описаны сверхвысоковольтные распорки для ВЛ классов до 765 кВ, одновременно выполняющие роль виброгасителей. Такое свойство распорок обеспечивается за счет специальных уплотнителей из эластомера в местах крепления отдельных прутков связи. Вставки из эластомера регулируют упругость и обеспечивают демпфирование колебаний. Металлические части распорок выполнены из высокопрочного алюминия и нержавеющей стали, что исключает проблему коррозии. В распорках используется принцип поглощения энергии вместо обычного способа борьбы с вибрацией путем подстройки механической частоты.

Нагревостойкие алюминиевые сплавы для проводов ВЛ. — «Хитати хёрон, Hitachi hyogon», 1973, 55, № 7, с. 41—46. Нагревостойкие провода из алюминиевых сплавов имеют меньшее сопротивление; предел прочности составляет 17,9—18,2 кс/мм², который не снижается при температуре 150—200 °С. Приведены основные характеристики проводов, данные их прочности при температурах до 400 °С и при временах нагрева до 1000 ч, их стойкости против коррозии.

Математические модели экономической оптимизации систем электроэнергетики ГДР. — «Energietechnik», 1973, 23, № 9, с. 391—395. Описываются математические модели (ММ) оптимального производства, распределения и потребления электроэнергии, долгосрочного планирования и балансирования электроэнергетики ГДР. За критерий оптимизации принят минимум общих затрат. В настоящее время в ГДР созданы ММ экономической оптимизации практически всех областей энергосистемы. Так, центральная ММ оптимизации продукции позволяет оптимально определять: структуру энергосистемы; структуру и баланс важнейших естественных и искусственных энергоносителей; структуру использования собственных энергетических ресурсов; структуру импорта энергоносителя. Для обслуживания отдельных отраслей энергетики созданы отраслевые ММ оптимизации продукции. Для проверки соответствия результатов оптимизации условиям воспроизводства созданы ММ оценки эффективности производства. Вычисление необходимого количества энергии и величины продукции основных энергоносителей производится балансно-оптимизирующими ММ.

Качания в электроэнергетической системе. — «EFI — nytt», 1973, 13, № 2, с. 2—7. Термин «синхронные качания» употребляется в случае, когда агрегат работает синхронно с остальной системой, но частота его колеблется около среднего значения. Период колебания составляет около 1 сек. Качания в электроэнергетических системах Норвегии наблюдались впервые после того, как в 1962 г. энергосистема Эстлани была соединена с электроэнергетической системой Трённелага. Поскольку электроэнергетическая система Трённелага с 1959 г. имеет связь с энергосистемой Швеции, то создавалась длинная связь Эстлани — Трённелаг — Швеция с благоприятными условиями для качаний. Имело место нарушение устойчивости после качаний продолжительностью 6—8 сек, первоначально приписанное системе регулирования. Расчеты показали возможность распространения качаний на всю единую электроэнергетическую систему Норвегии, чувствительную к угловым колебаниям. Явления качаний успешно моделируются механической системой, состоящей из массы и пружины. Отмечается, что в электроэнергетических системах необходимо сочетать управление нагрузочным моментом с регулированием напряжения, для чего целесообразны демпфирующие устройства.

Проектирование электрических распределительных сетей в населенных пунктах. — «Sven. elverksfören. handl.», 1972, № 14, с. 31. В 1969 г. в Швеции создан комитет по распределительным сетям в составе представителей электроснабжающих и научных организаций, а также представителей других скандинавских стран. Доклад комитета содержит принципы и методы проектирования распределительных сетей, прогнозы нагрузок, технико-экономические проблемы, качество энергии и основы расчетов сетей высокого и низкого напряжений.

Расчетные уровни нагрузок приняты на основании анализа современных (1970 г.) данных и прогноза роста потребления до 1990 г. Рассматриваются варианты обычной нагрузки (в 1970 г. — 1,6 кВт на дом для коттеджей и 1,2 кВт на квартиру для многоквартирных домов; в 1990 г. — 2,2 кВт или 800 кВт·ч/год для одного коттеджа и 1,6 кВт или 600 кВт·ч/год на квартиру для многоквартирного дома) и электроотопления (в 1990 г. — соответственно 9 кВт или 30 000 кВт·ч/год на коттедж и 5,5 кВт или 17 000 кВт·ч/год на квартиру). Питательная сеть имеет напряжение 130 кВ. Расчеты произведены на ЦВМ по специально разработанным программам. Сравнение вариантов произведено по суммарным годовым затратам и определены области применения ТП различных мощностей и сетей различной конфигурации.

Моделирование надежности электроэнергетических систем на ЦВМ с помощью метода Монте-Карло. — «J. Inst. Eng. (India) Elec. Eng. Div.», 1973, 53, № 5, с. 190—193. Описываются две программы оценки надежности электроэнергетических систем на ЦВМ, основанные на моделировании случайных процессов по методу Монте-Карло. Первая программа используется для учета нормальных условий окружающей среды, вторая — для ненормальных (штормовых и т. п.). Данные об окружающей среде и параметры элементов системы генерируются с использованием экспоненциального распределения. Подробно описаны блок-схемы программ. Отмечается, что в отличие от программ, основанных на использовании метода Маркова, где процесс моделирования лимитируется возможностями запоминающих устройств ЦВМ, программы, использующие метод Монте-Карло, не имеют подобных ограничений. При этом точность результатов оказывается высокой, однако время для расчетов по методу Монте-Карло оказывается значительно больше.

Выбор способа заземления нейтрали с учетом 3-й гармоники тока. — «IEEE Conf. Rec. Annu. Pulp and Pap. Ind. Techn. Conf., Jacksonvill, Fld. 1973», 1973, с. 24—33. Показано, что рациональное заземление нейтрали (Н) позволяет значительно уменьшить токи 3-й гармоники, наличие которых снижает допустимые нагрузки генераторов, трансформаторов и другого оборудования. Для схемы, состоящей из двух генераторов, соединенных параллельно и подключенных к трансформатору, обмотка которого соединена в звезду, произведено сопоставление пяти вариантов заземления Н в двух вариантах Н трансформатора глухо заземлена, а Н генераторов либо глухо заземлены, либо в них включены реакторы. Эти варианты характеризуются большими токами однофазных коротких замыканий и большими токами 3-й гармоники. В трех вариантах в Н трансформатора включено активное сопротивление, а в Н генераторов включены индивидуальные активные сопротивления либо используется общее сопротивление. При общем сопротивлении токи 3-й гармоники при несимметричных нагрузках генераторов в 30 раз больше, чем в схеме с индивидуальными сопротивлениями. Для устранения этого недостатка предлагается Н генераторов подключать к общему сопротивлению через выключатели, схема блокировки которых позволяет присоединить к сопротивлению только один генератор. При разной нагрузке генераторов к сопротивлению присоединяется более нагруженный. Последняя схема наиболее предпочтительна.

Защита людей при повреждениях изоляции. — «IEEE Conf. Rec. 25-th Annu. Conf. Elec. Eng. Probl. Rubber and Plast. Ind., Akron, Ohio, 1973», 1973, с. 62—67. Опасность поражения людей при повреждении изоляции постоянно возрастает в результате расширения применения электрической аппаратуры и инструмента. В связи с этим в «Национальных правилах безопасности для электрических установок» (США) продолжают усиливаться требования по защите людей. Величина тока срабатывания защиты для установок общего пользования установлена в 5 мА. Время срабатывания не должно превосходить величины, определяемой уравнением: $T = (20/I)^{1.43}$, где T — время, сек; I — ток, мА.

Токи обратного (главного) разряда молнии, зарегистрированные во Флориде. — «J. Geophys. Res.», 1973, 78, № 18, с. 3530—3537. Отмечается, что ранее были предприняты попытки определить форму тока обратного разряда молнии путем измерения электрических и магнитных полей (Нориндер и Дейль, 1945 г.; Крум, 1964 г.; Сривастава и Таутри, 1966 г.). В этих измерениях использовалась модель обратного разряда молнии Брюсса и Говлда (1941), которая имеет ряд недостатков. Сделана попытка определить ток молнии путем измерения напряженности электрического поля близких раз-

рядов молнии; эти токи необходимы, в свою очередь, для расчетов напряженности поля. При расчетах обратного разряда с прямым и вертикальным каналом используется модель длинной линии. Для удобства предполагается, что скорость обратного разряда молнии постоянна и для следующих следов за первым разрядом, хотя это допущение справедливо лишь для первого обратного разряда. Расчет тока обратного разряда на расстоянии L с помощью измерений напряженности поля осуществляется с помощью зависимости, полученной Уман и другими в 1973 г. для определенной скорости обратного разряда, сравнением результатов расчета и измерений и последующей итерацией вплоть до получения наилучшей схожести тока и скорости. Измерения были выполнены для разрядов молнии над землей и над водой. Всего было зарегистрировано 98 импульсов при 21 разряде молнии на расстоянии менее 10 км и 63 импульса при 18 разрядах на расстояниях между 10 и 32 км. В последнем случае 31 импульс при восьми разрядах молнии происходил над водой. Статистическое распределение амплитуд токов молнии хорошо согласуется с предыдущими измерениями, хотя средняя амплитуда тока, полученная для 98 близких разрядов, примерно втрое превышает значения, полученные в предыдущих работах. Распределение амплитуд токов молнии 63 разрядов для расстояний ближе, чем 10 км, очень хорошо совпадают с распределением, полученным Люисом и Фаустом в 1945 г. Длительность фронта импульса тока составляет 0.5–5 мкс и хорошо согласуется со значениями 1–3 мкс, приводимыми в литературе. При исследованиях было обнаружено, что на импульс тока со времени спада до значения, равного половине максимума 10 мкс, накладываются явно выраженные пики тока. При прямых измерениях токов молнии резкий пик отсутствует и соответствующее время спада составляет 30–40 мкс.

Определение заряда и потенциала горизонтального провода, обусловленного зарядом лидера молнии. — «Rev. gen. sci. techn. Sér. électrotechn. et énerг.», 1973, 18, № 2, с. 251–262. При движении лидера молнии к земле как в самой земле, так и на наземных предметах возникают значительные потенциалы, величина которых зависит от таких параметров, как расстояние от предмета до лидера, от размеров предмета, заряда лидера и пр. В работе рассчитывается потенциал, возникающий на горизонтальных проводах, и наведенный в таких проводах заряд. Расчет сделан при условии, что начальный потенциал провода был равен нулю. Лидер заменяется полубесконечным вертикальным цилиндром, конец которого со стороны земли имеет форму эллипсоида. Весь расчет сделан при одних и тех же размерах цилиндра и эллипсоида, горизонтальные полусоси которого $a=b=20$ м и вертикальная полусось $c=40$ м. Необходимая при определении поверхностной плотности наведенного в проводе заряда напряженность электрического поля лидера задается распределением объемного заряда в полубесконечном цилиндре и эллипсоиде; показано, что основная роль при выбранной геометрии «лидера» принадлежит эллипсоиду, т. е. распределение заряда в цилиндре можно не учитывать. Решение задачи о плотности наведенного в проводе заряда приводит к зависимости Q от расстояния A между лидером и проводом, от высоты провода над землей и его радиуса, и к распределению заряда вдоль провода. Потенциал на проводе, определяемый в результате решения уравнения Пуассона, в первую очередь зависит от расстояния между лидером и проводом: высота провода над землей оказывает сравнительно небольшое влияние:

$$V = -\frac{1}{\pi \epsilon_0} \rho f(A) \varphi(A) r_0 \ln \frac{2h_0}{r_0}.$$

Здесь ρ — плотность объемного заряда лидера; r_0 и h_0 — радиус провода и его высота над землей; $f(A)$, $\varphi(A)$ — функции от расстояния A . Полученные для потенциала V и наведенного на проводе заряда Q выражения позволяют сделать оценку этих величин для различных условий. Полученные соотношения позволяют точнее, чем это делалось до сих пор, оценить перенапряжения на проводах ВЛ в условиях приближения лидера молнии к земле,

Косвенный способ, использующий методы характеристик и суперпозиции для расчета внутренних перенапряжений. — «IEEE Trans. Power Appar. and Syst.», 1973, 92, № 3, с. 916–924. Предлагаемый метод (М) предназначен для расчета на ЦВМ внутренних перенапряжений (коммутационных) (КП) в трехфазных разветвленных системах и основан на использовании М суперпозиции. Разработанная программа расчета КП использует переходные характеристики элементов схемы, рассчитываемые по существующим программам, которые базируются либо на М бегущих волн, либо на решении системы дифференциальных уравнений при эквивалентировании ВЛ программными ячейками. Программа же дает возможность учесть элементы с нелинейными характеристиками. Если для существующих М расчетное время пропорционально числу элементов исследуемой системы, то для предлагаемого М расчетное время не зависит от конфигурации схемы. Исключение здесь составляет блок расчета переходных характеристик. Расчетное время по предлагаемой программе пропорционально квадрату числа итераций, требуемых для решения, в то время как для большинства существующих программ имеет место линейная связь между временем расчета и числом расчетных шагов. Однако существует область значений расчетного шага, для которой суммарное время расчета по этой программе меньше, чем для программ, основанных на прямых М. Объем программ требует использования современных ЦВМ или же дополнительных накопителей. При использовании разработанного М расчетное время для КП в схеме, состоящей из пяти генераторов, двух трансформаторов и восьми ВЛ, приблизительно в 10 раз меньше, чем для М характеристик. Точность программ проиллюстрирована сопоставлением реальных и расчетных КП.

Проблемы индуктированных токов, вызываемых солнечной деятельностью. — «Elec. World», 1973, 179, № 11, с. 44. Геомагнитные бури, вызываемые солнечной активностью, способны создавать заметные индуктированные токи в электрических сетях, представляющие более серьезную опасность, чем это предполагалось раньше. Переходные геомагнитные поля наводят на поверхности земли напряженности поля 3–6 в/км и более. Эти поля могут вызвать нежелательный эффект в ВЛ и линиях связи. По имеющимся данным индуктированные токи могут нарушать работу релейной защиты, режимы работы электроэнергетических систем за счет появления составляющей в намагничивающем токе силовых трансформаторов и измерительных трансформаторах и неблагоприятно влиять на режимы передач постоянного тока.

Исследование явлений разряда путем измерения поля на электродах. — «Rev. gen. sci. techn. Sér. électrotechn. et énerг.», 1973, 18, № 2, с. 219–250. Рассматривается теория, конструктивное выполнение и опыт применения зонда для измерения напряженностей поля в междуэлектродном промежутке. Исследовался промежуток сфера — плоскость длиной от 6,25 до 100 см при напряжении промышленной частоты и импульсах (волна 145/3700 мкс). Один или несколько зондов размещались в отверстиях на уровне заземленной плоскости. Осциллограммы напряжения на зондах давали возможность зафиксировать детали развития лидерного и стримерного процесса. Рассмотрены погрешности измерения.

Руководство к расчету разрядных напряжений длинных воздушных промежутков. — «Z. elek. Inform. und Energie-techn.», 1973, 3, № 4, с. 186–192. В длинных промежутках разряд развивается в лидерной форме. В основу расчетов положена картина развития разряда в конце лидерной стадии, когда стримерная зона лидера достигла противоположного электрода. Определяется зависимость длины стримерной зоны от длины воздушного промежутка и далее суммируется падение напряжения на стримерной зоне и вдоль термоионизированного канала лидера. Результаты расчетов, выполненных исходя из экспериментально определенных величин падения напряжения на единицу длины канала лидера и стримера, сопоставлены с экспериментальными данными о разрядных напряжениях. Теоретическая экстраполяция экспериментальной кривой разрядных напряжений для промежутка стержень — плоскость произведена до 500 м.

Канд. техн. наук ПАВЛОВ Л. И., инж. ФОНАРЕВА М. В.

Тимофеев Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками.

Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1972.

296 с., ц. 86 к.

В связи с широкими масштабами электрификации магистральных железных дорог появилась необходимость в статистико-вероятностных методах исследования и расчета режимов электрических систем с тяговыми нагрузками. Монография канд. техн. наук Д. В. Тимофеева излагает разработанные автором основные положения методов исследования и расчетов параметров установившихся режимов, а также методов оптимизации проектных решений и рабочих режимов электрических систем. Следует отметить, что расчеты симметричных, несимметричных и несинусоидальных режимов при случайном характере изменения нагрузок представляют собой значительную трудность и книга Д. В. Тимофеева является первой успешной работой по этим вопросам. Методика расчета симметричных, несимметричных и несинусоидальных режимов, описываемая в монографии, позволяет определить основные вероятностные характеристики напряжений и токов прямой и обратной последовательностей основной частоты и высших гармоник в любых точках и ветвях систем, а также позволяет вести оценку влияния факторов, улучшающих качество напряжений и экономичность работы сети.

Книга состоит из двух частей. Первая часть — «Симметричные и несимметричные режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками». В гл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения фазных токов и тяговых нагрузок и напряжений на тяговой стороне. Следует отметить строгость постановки и значительный объем экспериментальных исследований, проведенных при определении основных вероятностных характеристик токов и напряжений тяговых нагрузок, необходимых в качестве исходных данных для расчетов установившихся режимов. Эти характеристики даны для широкого диапазона изменения числа пар поездов и являются универсальными для различных участков железных дорог.

В гл. 2 «Вероятностные методы расчета параметров установившихся режимов в электрических системах с мощными тяговыми нагрузками» представлен алгоритм вероятностного метода расчета режимов со случайными несимметричными нагрузками. По нашему мнению, этот вопрос представляет особенный интерес. Исследование случайных процессов, протекающих в электрической системе с тяговыми нагрузками, осуществляется прямым воспроизведением этих случайных нагрузок на математической модели с помощью ЦВМ. На кафедре «Электрические станции, сети и системы» Иркутского политехнического института производились расчеты несимметричного режима с помощью программы, разработанной во ВНИИЭ на основе метода, описываемого в монографии. Расчеты велись для систем небольшой мощности (до 1000 Мвт), где имеют место тяговые нагрузки на однофазном токе. Сопоставление результатов расчетов с замерами токов и напряжений в исследуемых точках энергосистемы показали достаточную точность количественной оценки, произведенной по вышеописанному вероятностному методу.

В следующих главах рассмотрены симметрирующие свойства основных средств и дополнительных статических устройств, приведены весьма существенные выводы о том, что для уменьшения несимметрии токов и напряжения в распределительной сети и особенно в питающей электрической системе чередование присоединения фаз контактной сети к трехфазной системе следует производить не по циклической системе, а с учетом распределения нагрузок по плечам всех подстанций, двухмерных законов распределения всех задающих токов, стохастической связи между фазными токами одной и той же и разных подстанций. Показана возможность реального снижения несимметрии в системе с помощью нерегулируемых поперечных фильтров. Исследования, проведенные на кафедре Иркутского политехнического института по симметрированию режима в одной из энергосистем с использованием методов, описанных в монографии, подтверждают

правильность приведенных в книге положений о симметрирующих свойствах основных средств и дополнительных устройств.

В отличие от предыдущего издания книги в новом издании рассмотрены вопросы: режимы напряжений в электрических сетях и повышение экономичности работы электрических сетей с мощными тяговыми нагрузками, которые для многих энергосистем являются проблемными. Эти вопросы автором решаются также с позиций статистико-вероятностного метода с учетом стохастической связи между отдельными параметрами режима.

В книге обобщены результаты обширных экспериментальных исследований закономерностей изменения напряжений всех последовательностей на тяговой стороне, а также сделаны соответствующие выводы о путях повышения качества напряжения в энергосистемах, имеющих тяговые нагрузки. Дана методика комплексного решения вопросов улучшения качества напряжения и оптимизации режимов энергосистемы.

Вторая часть книги озаглавлена «Несинусоидальные режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками». По нашему мнению, результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения токов и напряжений высших гармоник, приведенные в гл. 7, являются очень важными, поскольку эти вопросы весьма слабо разработаны и освещены в литературе, хотя настоятельная необходимость в их исследовании назрела.

Глава 8 «Основные положения метода расчета несинусоидальных режимов в электрических системах», по нашему мнению, является оригинальной и в своем роде единственной серьезной попыткой расчета высших гармоник тока и напряжения, так как автор решает эти вопросы статистико-вероятностным методом. На кафедре производились расчеты гармоник тока и напряжения с помощью упрощенно-вероятностного метода, описываемого в монографии. Сопоставление результатов расчетов и замеров высших гармоник тока и напряжения в системе показали точность, вполне приемлемую для многих практических целей.

Характеризуя книгу Д. В. Тимофеева в целом, следует отметить ее актуальность, очень высокий научно-технический уровень, большой объем экспериментальных работ, выполненных автором и под его руководством, а изложенные методы расчета приемлемы не только при тяговых нагрузках, но и при любых случайных нагрузках, изменяющихся по любому закону, если процесс их изменения является стационарным и обладает свойством эргодичности.

Существенным недостатком книги является то, что все без исключения главы написаны слишком сжато, многие формулы даны без выводов, без поясняющих векторных диаграмм, что очень затрудняет изучение материала книги. Несмотря на то, что вся книга отличается последовательностью, логичностью изложения, иллюстрирована примерами, пониманием отдельных глав и многих положений усложняется отсутствием дополнительных разъяснений. Методы расчета несинусоидальных режимов мало иллюстрированы примерами. Очевидно, все это объясняется малым объемом книги, и поэтому некоторые главы автор был вынужден печатать мелким шрифтом. К сожалению, книга не имеет жесткого переплета.

Конечно, книгу следует переиздать в более расширенном, детальном изложении многих глав, особенно по расчету несинусоидальных режимов. Понятно, для этого потребуются увеличить объем книги. Лучше всего книгу переработать не в виде сжатой монографии, каковой она является теперь, а в виде учебника. В этом случае она была бы очень полезной и интересной для студентов вузов специальностей 0301, 0303 и 1602, поскольку применение статистико-вероятностных методов соответствует тенденциям последних лет.

ХОМУТОВ Б. А., ВИСЯЩЕВ А. Н., НЕВСКИЙ В. А.,
ИДЕЛЬЧИК В. И., НЕЙМАН В. В., РЫСЕВ А. М.

Мушик Э. — Применение теории игр к проблемам электро-снабжения	1
Каялов Г. М., Молодцов В. С. — Определение значений параметров сложной электрической сети, близких к оптимальным	8
Кимельман Л. Б., Лосев С. Б., Россровский Е. Л. — Основы информационной структуры комплекса программ для решения сетевых задач для ЭВМ третьего поколения	13
Цукерник Л. В. — О критике теории статической устойчивости энергосистем	21
Москалев А. Г. — Надежность, качество энергии и экономичность функционирования энергетического предприятия	31
Александров Г. Н., Редков В. П. — Исследование электрической прочности изоляции линий сверхвысокого напряжения	38
Базелян Э. М., Левитов В. И., Пулавская И. Г. — Электрический разряд в многоэлектродных системах	44
Мош В., Хаушильд В. — О расчете пробивного напряжения в элегазе (SF ₆) в системе коаксиальных цилиндров	50
Гончарик Е. П. — Напряжения, индуцированные на автотранспорте в электрическом поле ВЛ	54
Данилевич О. И. — Учет влияния тока утечки на процесс заряда емкостного накопителя	58
Поссе А. В. — Эквивалентные параметры вентильного преобразователя при линейном изменении угла регулирования	63

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Лернер М. М. — О границах диапазона возможных потерь в безындукционном электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения	68
Левитов В. И., Решидов И. К., Кизим И. А. — Влияние технологических параметров газов на эффективность электрофильтров	71

СООБЩЕНИЯ

Хачатрян В. С. — Определение установившихся режимов больших энергосистем методом подсистем	75
Корытин А. М., Соколова Е. М. — Комбинированный метод исследования быстродействующего следящего электропривода при дискретном сигнале управления на физической и математической моделях	78
Вайнштейн Р. А., Пушков А. П. — Полупроводниковое направленные реле сопротивления с использованием параметрического делителя частоты	80
Тарасова Т. Н. — Условия накопления положительного объемного заряда при напряжении высокой частоты в воздушных промежутках различной конфигурации	84
Есенин В. В. — Термокомпенсация цепей RC	88
По страницам технических журналов	89

БИБЛИОГРАФИЯ

Хомутов Б. А., Висящев А. Н., Невский В. А., Идельчик В. И., Нейман В. В., Рысев А. М. — Книга Тимофеева Д. Б. «Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками»	93
--	----

CONTENTS

Application of Game Theory to Power Supply Problems. — E. Mushik	1
Determining Almost Optimum Values for Complex Power System Parameters — G. M. Kayalov, V. S. Molodsov	8
Fundamentals of the Information Structure for a Complex of Network Analysis Programs on a Third Generation Computer — L. B. Kimelman, S. B. Losev, E. L. Rossowski	13
A Critical Appraisal of the Theory of Power System Steady-State Stability — L. V. Tsukernik	21
The Reliability, Quality of Energy, and Cost Characteristics of a Power Installation — A. G. Moskaev	31
A Study of the Electrical Withstand Strength of EHV Line Insulation — G. N. Alexandrov, V. P. Redkov	38
Electric Discharge in Multi-Electrode Systems — E. M. Bazelyan, V. I. Levitov, I. G. Pulavskaya	44
Calculating the Breakdown Voltage in SF ₆ of a System of Coaxial Cylinders — V. Mosh, V. Howshild	50
Voltages Induced on Vehicles in the Field of a H. V. Line — E. P. Goncharik	54
Account of Leakage Current in the Charging Process of a Capacitor Bank — O. I. Danilevitch	58
Equivalent Parameters of an Electronic Converter for Linear Variation of the Control Angle — A. V. Posse	63

FROM OPERATING EXPERIENCE

The Range of Possible Losses in a Non — Inductive Capacitor Subjected to a Non — Sinusoidal Voltage — M. M. Lerner	68
How the Technological Parameters of Gases Influence the Effectiveness of Electric Filters — V. I. Levitov, I. K. Reshidov, I. A. Kizim	71

REPORTS

Determining the Steady-State of Large Power Systems by the Method of Subsystems — V. S. Khatchatrian	75
A Comprehensive Method of Studying a High — Speed Servo Drive for Discrete Control Signals Using Model Systems and Mathematical Models — A. M. Koritin, E. M. Sokolova	78
A Semiconductor Directional Impedance Relay Using a Parametric Frequency Divider — R. A. Weinstein, A. P. Pushkov	80
Conditions for Accumulating Space Charge for a High — Frequency Voltage Across Air Gaps of Various Configuration — T. N. Tarasova	84
Thermal Compensation of RC Networks — V. V. Yesenin	88

IN OTHER ENGINEERING JOURNALS

BIBLIOGRAPHY	93
------------------------	----



УДК 621.311.1.001.24

Определение значений параметров сложной электрической сети, близких к оптимальным. Каялов Г. М., Молодцова В. С. — «Электричество», 1974, № 5.
Предложен метод приближенного определения оптимальных параметров сети с помощью обоснованных в статье простых выражений для потерь мощности и электроэнергии в сложной сети в функции от ее параметров. Дан пример применения предложенного метода к выводу формул для определения экономических сечений в сложной замкнутой электрической сети. Библ. 5.

УДК 621.311.003.13

Надежность, качество энергии и экономичность функционирования энергетического предприятия. Москалев А. Г. — «Электричество», 1974, № 5.
Рассматривается связь между показателями надежности средств труда (оборудования, сооружений) энергетического предприятия, качества поставляемой потребителям энергии и рентабельностью функционирования энергетического предприятия. Приводятся общие математические зависимости стоимости средств труда, издержек на их ремонт, платы за фонды и на реновацию, размера реализации от надежности средств труда и качества поставляемой потребителям энергии, а также издержек на компенсацию последним за недостаточную надежность энергоснабжения и недостаточное качество поставляемой энергии. Устанавливаются особые точки основной экономической характеристики надежности энергетического предприятия. Приводятся результаты определения упомянутых характеристик для предприятий распределительных электрических сетей, находящихся на полном хозяйственном расчете, расположенных в различных географическо-климатических зонах, имеющих разную степень загрузки ВЛ, а также результаты вычисления оптимальных, максимальных критических и минимальных критических значений коэффициента бесперебойности энергоснабжения. Библ. 8.

УДК 537.52

Электрический разряд в многоэлектродных системах. Базелян Э. М., Левитов В. И., Пулавская И. Г. — «Электричество», 1974, № 5.
Проведен теоретический анализ особенностей разряда в системе из нескольких разрядных промежутков. Показано, что известные формулы для распределения пробивных напряжений системы промежутков и для вероятности пробоя каждого из промежутков, полученные с помощью теории вероятности, пригодны только для несвязанной системы, где отсутствует взаимное влияние разрядных процессов в промежутках. У связанной системы, где такое влияние существует, распределение пробивных напряжений системы и вероятности пробоя промежутков зависят от степени взаимного влияния разрядов, учитываемого коэффициентом связи.
Экспериментально показано, что изменением условий развития встречного разряда, определяющего степень взаимного влияния, можно изменять вероятность поражения заземленных электродов в пределах 0,2–0,5 без изменения их высоты. Библ. 9.

УДК 621.315.1

Напряжения, индуцированные на автомобилях в электрическом поле ВЛ. Гончарик Е. П. — «Электричество», 1974, № 5.
Излагается методика расчета электростатических наводок на автомобилях в электрическом поле ВЛ. Приводятся экспериментальные значения потенциалов и токов, индуцированных на автомобилях под ВЛ 330 кВ, и расчетные значения под ВЛ класса 330, 750 и 1150 кВ. Высказываются соображения о необходимости заземления автотранспортных средств при их работе под линиями класса 750 и 1150 кВ. Библ. 7.

УДК 621.314.5.001.24

Эквивалентные параметры вентильного преобразователя при линейном изменении угла регулирования. Поссе А. В. — «Электричество», 1974, № 5.
На основе полученного приближенного разностного уравнения найдены эквивалентные параметры вентильного преобразователя, позволяющие свести задачу о переходных процессах при линейном изменении угла регулирования к расчету линейной цепи. Выяснена зависимость эквивалентных параметров от скорости изменения угла регулирования. На трех примерах показана эффективность и достаточная для практических целей точность расчета переходных процессов путем замены преобразователя эквивалентным генератором. Библ. 9.

УДК 621.314.69.017.1

Учет влияния тока утечки на процесс заряда емкостного накопителя. Данилевич О. И. — «Электричество», 1974, № 5.
Исследованы процессы заряда емкостного накопителя от однофазного и трехфазного мостовых зарядных выпрямителей с индуктивным токоограничением с учетом токов утечки.
Получены аналитические выражения для определения времени заряда конденсатора, а также графические зависимости, позволяющие найти оптимальные параметры зарядного выпрямителя. Библ. 7.

УДК 621.319.4.017.001.24

О границах диапазона возможных потерь в безындукционном электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения. Лернер М. М. — «Электричество», 1974, № 5.
Приведено доказательство того, что нижняя граница возможных потерь в безындукционном конденсаторе при несинусоидальном воздействии равна мощности потерь при синусоидальном напряжении с таким же действующим значением и на такой же частоте, что у несинусоидального напряжения. Верхняя граница возможных потерь равна потерям в конденсаторе, тангенс угла потерь которого меняется прямо пропорционально частоте. Библ. 4.

УДК 621.359.42

Влияние технологических параметров газов на эффективность электрофильтров. Левитов В. И., Решидов И. К., Кизим И. А. — «Электричество», 1974, № 5.
Изложены результаты испытаний опытного электрофильтра с электродами высотой 12 м, установленного после энергоблока 300 Мвт на Троицкой ГРЭС.
Приведены зависимости степени очистки газов и эффективной скорости дрейфа от скорости и температуры дымовых газов, а также результаты кондиционирования дымовых газов перед опытным электрофильтром амином.
Показано, что задача эффективного улавливания высокоомной золы экибастузского угля энергоблоков 590 Мвт может быть решена при температурах уходящих газов в пределах 120 °С применением электрофильтров с электродами высотой 12 м, а при более высоких температурах необходимо кондиционирование дымовых газов. Библ. 3.

УДК 621.311.1.001.24

Определение установившихся режимов больших энергосистем методом подсистем. Хачатрян В. С. — «Электричество», 1974, № 5.
Предлагается метод расчета установившихся режимов современных сложных и больших энергосистем, основанный на Z-форме задания состояния сети. В основу метода положена идея представления заданных больших энергосистем совокупностью радиально связанных подсистем. Метод позволяет решить поставленную задачу при любой форме задания исходной информации относительно станционных и нагрузочных узлов.

УДК 62-83:62-503.53

Комбинированный метод исследования быстродействующего следящего электропривода при дискретном сигнале управления на физическом и математическом моделях. Корытин А. М., Соколова Е. М. — «Электричество», 1974, № 5.
Предложен комбинированный метод анализа следящего тиристорного электропривода с импульсным сигналом управления на физической и математической моделях. Метод позволяет оценить влияние фильтров управляющих усилителей, частоты управляющего сигнала на качество процесса управления. Даны рекомендации по выбору элементов системы и параметров дискретного сигнала управления. Библ. 2.

УДК 621.316.925.45

Полупроводниковое направленное реле сопротивления с использованием параметрического делителя частоты. Вайнштейн Р. А., Пущков А. П. — «Электричество», 1974, № 5.
Описано реле сопротивления, в котором для устранения «мертвой зоны» используется напряжение, снимаемое с параметрического делителя частоты, причем значение и фаза этого напряжения зависят от удаленности точки короткого замыкания.
Приведены результаты исследования реле в установившихся и переходных режимах при повышенных погрешностях трансформаторов тока. Библ. 4.

УДК 537.212

Условия накопления положительного объемного заряда при напряжении высокой частоты в воздушных промежутках различной конфигурации. Тарасова Т. Н. — «Электричество», 1974, № 5.
Определены области возможного накопления положительного объемного заряда в промежутках различной конфигурации. Для промежутков с неоднородным электрическим полем получено выражение, связывающее частоту и величину приложенного напряжения соответствующих выполнению условий накопления заряда. Для промежутков с однородным электрическим полем получена зависимость возможного снижения высокочастотного разрядного напряжения от расстояния между электродами.
Показано, что для промежутков со слабонеоднородным полем для оценки критической частоты и величины высокочастотного разрядного напряжения можно использовать вольт-частотные характеристики, рассчитанные из условия накопления заряда. Библ. 7.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Афанасьев, А. И. Бертинов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, И. С. Ефремов, Д. Г. Жимерин, А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, Л. Г. Мамиконянц (главный редактор), Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Адрес редакции: 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.

Почтовый адрес: 101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Л. М. Кузнецова

Сдано в набор 15/III 1974 г.
Формат 60×90/8
Тираж 9 769 экз.

Подписано к печати 26/IV 1974 г.
Усл. п. л. 12
Зак. 696

T-20897
Уч.-изд. л. 14,37
Цена 80 коп.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шляжовая наб., 10.

Elektrim



ПОВТ «ЭЛЕКТРИМ» ПРЕДЛАГАЕТ:

Энергетическое оборудование и объекты:
теплоэлектростанции, турбины, котельные, градирни,
паровые и водяные котлы, турбоагрегаты
Высоко- и низковольтные комплектные распределитель-
ные устройства
Высоко- и низковольтную аппаратуру
Силовые трансформаторы
Электрические машины постоянного и переменного тока
Оборудование электрической тяги и выпрямительную
аппаратуру
Оборудование проводной связи
Электроустановочное оборудование
Осветительную арматуру
Кабели и провода
Машины и устройства для кабельной промышленности
Приглашаем посетить нашу экспозицию на Польской
промышленной выставке «30 лет ПНР» в Москве, кото-
рая будет открыта с 18.7 по 18.8.1974 г. на территории
ВДНХ

Польское общество внешней
торговли по электротехнике

WARSZAWA, Czackiego 15/17
ПОЛЬША

Почтовый адрес:
00-950 WARSZAWA
Почтовый ящик: 638

т.е. адр.:
ELEKTRIM — WARSZAWA
Телефон: 26-62-71
Телетайп: 814 351

Сделано в Польше — значит хорошо



Elektrim

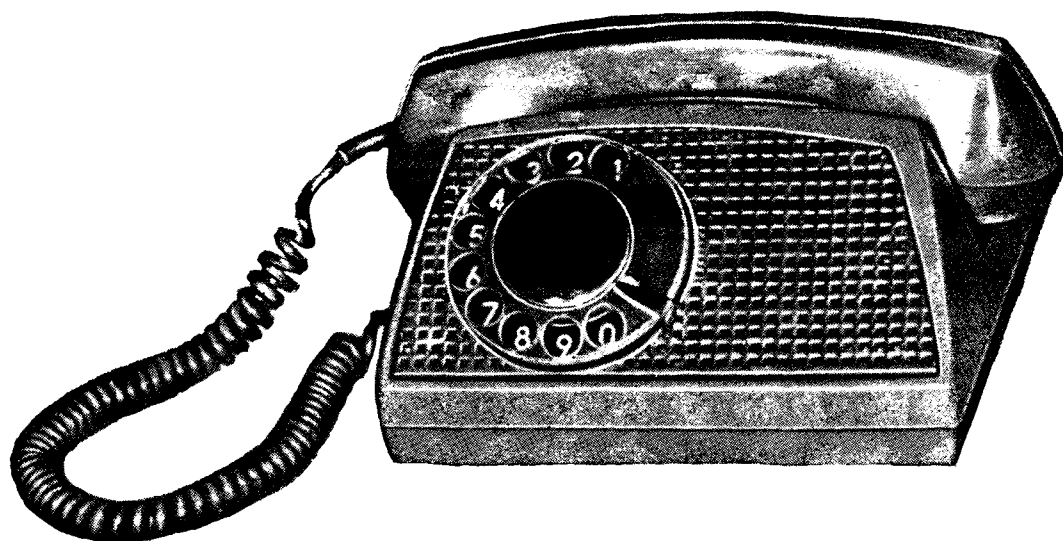
**ПОЛЬСКОЕ ОБЩЕСТВО ВНЕШНЕЙ ТОРГОВЛИ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
ЭЛЕКТРИМ**

«Электрим» предлагает:

электротехническую арматуру
осветительную декоративную арматуру и бытовые светильники
арматуру уличного освещения
аппаратуру связи — телефоны, домофоны, коммутаторы
батареи и аккумуляторы
сигнальные устройства
кабельные машины

Приглашаем посетить нашу экспозицию на выставке

«Сделано в Польше» — Вильнюс, 1974 г.,
которая открыта с 8 по 19 мая



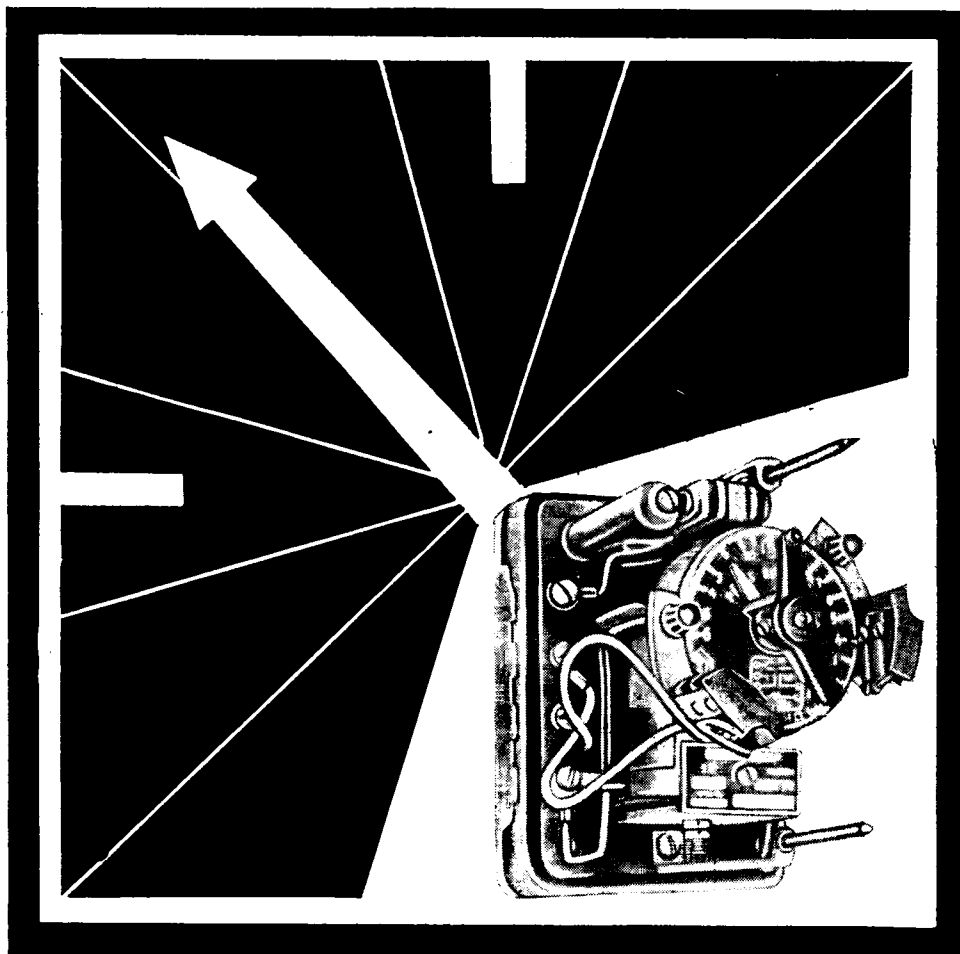
00—950, Варшава, Чацкого 15/17 — ПОЛЬША

Телегр. адрес: ЭЛЕКТРИМ — ВАРШАВА

Телефон: 26-62-71

Телетайп: 814351

Почтовый ящик: 638



РЕЛЕ ВРЕМЕНИ СЕРИИ ЭВ

предназначены для коммутации схем релейной защиты и автоматики на заранее заданные интервалы времени (от 0,1 до 20 сек). Работают на постоянном и переменном токе напряжения от 24 до 380 в в однофазных и трехфазных цепях и в диапазоне температур окружающего воздуха от -30 до $+40^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности до 70%. При установке максимальной выдержки времени гарантируют 5000 включений без механических повреждений и длительно выдерживают 110% номинального напряжения.

По желанию заказчика вместе с реле поставляются запасные части в широком ассортименте.

Экспортер: В/О «Энергомашэкспорт»
Москва, В-330,
Мосфильмовская, 35
Телекс: 7565



ENERGOMACHEXPORT