

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА  
НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ  
ЭНЕРГИИ

В. И. АНДРЕЕВ, Э. И. ВЕНЮКОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

При работе ударного генератора на индуктивную нагрузку в момент максимума тока в нагрузке сосредотачивается энергия, достигающая 10÷15% от энергии, запасенной маховыми массами ротора. Долю энергии, передаваемой ударным генератором нагрузке, можно увеличить, если осуществить накопление энергии в нагрузке. Ряд схем, осуществляющих эту идею описан в [1, 2, 3, 5]. Исследование схем накопления энергии в индуктивной нагрузке проведено в указанных работах в первом приближении при допущении постоянства скорости вращения ротора генератора. Между тем, скорость вращения ротора генератора в процессе передачи энергии нагрузке значительно уменьшается и это накладывает существенный отпечаток на результаты расчета. Изучение влияния уменьшения скорости вращения ротора на процесс передачи энергии в нагрузку проведем на примере наиболее простой из схем накопления энергии, представленной на рис. 1.

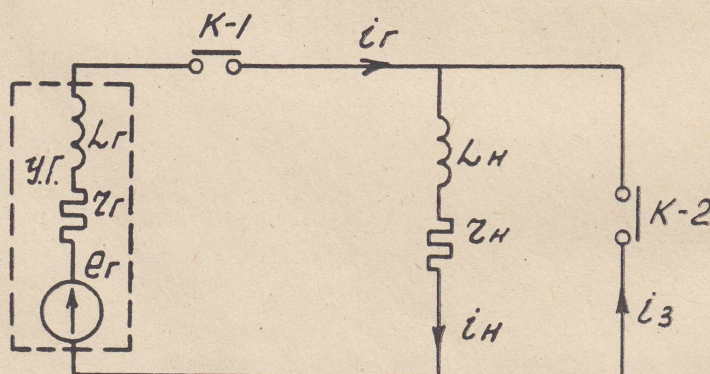


Рис. 1. Схема накопления энергии в индуктивной нагрузке от ударного генератора

Анализ явления внезапного короткого замыкания синхронной машины не вызывает затруднений [4]. Учитывая импульсный характер работы ударного генератора в схеме накопления энергии, можно использовать для контуров ротора закон постоянства потокосцепления, т. е. допустить, что активные сопротивления обмотки возбуждения и успокоительной обмотки равны нулю. В этом случае уравнения равно-

веса э. д. с. для обмотки статора при внезапном подключении индуктивной нагрузки можно представить в виде

$$(L_r + L_n) \frac{di_r}{dt} + (r_r + r_n) i_r = E_m \sin(\omega t + \psi), \quad (1)$$

где  $L_r = L''_d$  — сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора ударного генератора,

$L_n$  — индуктивность нагрузки,

$r_r = r_n$  — активные сопротивления обмотки генератора и нагрузки,

$E_m$  — амплитуда э. д. с. генератора,

$\omega$  — угловая частота,

$\psi$  — фазный угол э. д. с. в момент замыкания на нагрузку.

Коммутирующий аппарат К-2 разомкнут.

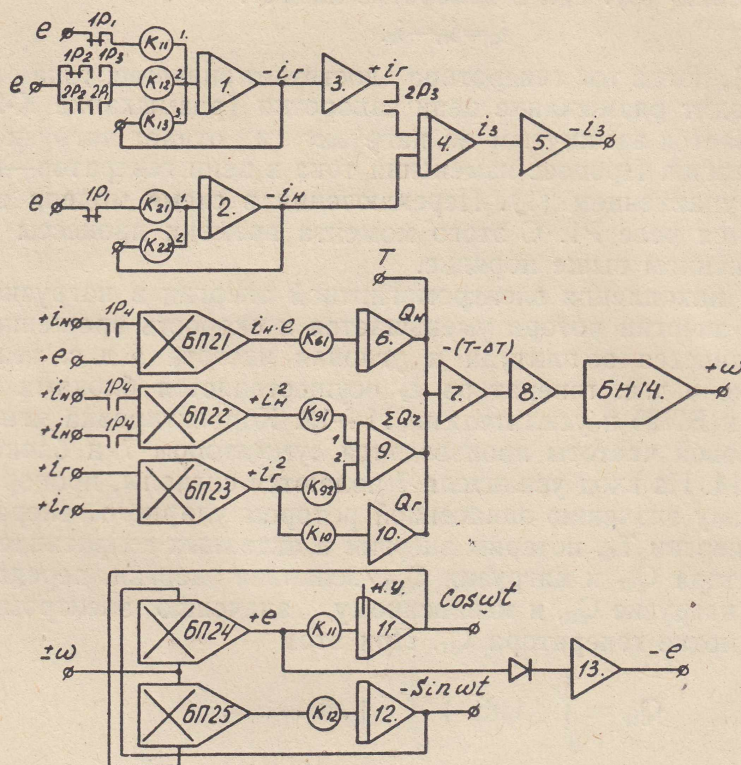


Рис. 2. Блок-схема математической модели процесса накопления энергии в индуктивной нагрузке

Процесс изменения тока в цепи генератор — нагрузка моделируется на интеграторах 1 и 2. Блок-схема математической модели представлена на рис. 2. Как правило, принимают, что включение генератора происходит в нуль э. д. с. ( $\psi = 0$ ). При нажатии кнопки «пуск» положительная полуволна э. д. с. генератора подается через нормально-замкнутые контакты реле Р1 на вход усилителей 1 и 2 и аналоговая машина обрабатывает решение уравнения (1). Когда ток в цепи генератора достигнет амплитудного значения, нагрузка шунтируется короткой. С этого момента времени ( $t_1$ ) процессы в цепях нагрузки и генератора описываются независимо друг от друга.

$$L_r \frac{di_r}{dt} + r_r i_r = E_m \sin \omega t, \quad (2)$$

$$L_H \frac{di_H}{dt} + r_H i_H = 0. \quad (3)$$

В схеме математической модели операция замыкания К-2 реализуется с помощью реле Р1, Р2, Р3. Ток в нагрузке затухает с постоянной времени цепи нагрузки. Ток генератора под воздействием отрицательной э. д. с. в обмотке стремится к нулю. В момент прохождения тока генератора через нуль ( $t_2$ ) размыкается К-1. Эта операция реализуется с помощью реле Р3. Генератор работает в режиме холостого хода до окончания отрицательной полуволны э. д. с. В момент перехода э. д. с. генератора через нуль на положительную полуволну ( $t_3$ ) вновь замыкается К-1 и генератор оказывается замкнутым накоротко. Переключения в схеме математической модели осуществляются реле Р2. Ток генератора резко нарастает. Значение тока генератора может быть найдено из решения уравнения (2). Ток в нагрузке продолжает изменяться согласно уравнению (3). Ток в закоротке падает:

$$i_3 = i_H - i_T. \quad (4)$$

В момент ( $t_4$ ), когда ток генератора достигнет значения тока нагрузки  $i_3 = 0$ , происходит размыкание цепи закоротки (размыкание К-2). Генератор оказывается замкнутым на нагрузку и отдает нагрузке очередную долю энергии. Процесс изменения тока в цепи генератор—нагрузка описывается уравнением (1). Переключения в схеме модели при  $i_3 = 0$  осуществляются реле Р1. С этого момента времени процессы повторяются в изложенном выше порядке.

По мере накопления электромагнитной энергии в нагрузке запас кинетической энергии ротора уменьшается и скорость вращения ротора падает. Изменяется амплитуда и угловая частота э. д. с. генератора. Формирование э. д. с. генератора  $e_r$  осуществляется блоками перемножения БП24 и БП25 и усилителями 11—12. Корректировка мгновенного значения угловой частоты производится сумматором 7 и блоком нелинейности БН14. На вход усилителя 7 подаются сигналы, пропорциональные начальному значению запасенной ротором ударного генератора кинетической энергии  $T_0$ , потерям энергии в активных сопротивлениях обмоток генератора  $Q_{rH}$  и нагрузки  $Q_{rH}$ , величине энергии, переданной генератором нагрузке  $Q_H$ , и мгновенному значению электромагнитной энергии в обмотке генератора  $Q_r$ . При этом

$$Q_H = \int_0^{t_1} e_r i_H dt + \int_{t_4}^{t_5} e_r i_H dt + \dots \quad (5)$$

Пределы интегрирования  $0-t_1$ ,  $t_4-t_5 \dots$  соответствуют периодам накопления энергии в нагрузке. В эти же периоды учитываются потери энергии в активном сопротивлении нагрузки.

$$Q_{rH} = \int_0^{t_1} r_H i_H^2 dt + \int_{t_4}^{t_5} r_H i_H^2 dt + \dots \quad (6)$$

Отработка пределов интегрирования осуществляется с помощью реле Р4.

Энергия, запасенная в электромагнитном поле обмотки статора,

$$Q_r = L_r \frac{i_r^2}{2}. \quad (7)$$

В течение первой полуволны тока эта энергия отбирается из запаса кинетической энергии ротора, а затем в течение второй полуволны по мере уменьшения тока генератора возвращается ротору. Потери энергии в активном сопротивлении обмотки статора

$$Q_{гг} = \int_0^{t_2} r_{гг} i_{гг}^2 dt + \int_{t_3}^{t_6} r_{гг} i_{гг}^2 dt + \dots, \quad (8)$$

где  $0-t_2$ ,  $t_3-t_6 \dots$  периоды, соответствующие протеканию тока генератора.

Блок нелинейности осуществляет операцию извлечения квадратного корня

$$\omega = \sqrt{\frac{2}{J} (T_0 - Q_{н} - Q_{г} - Q_{гн} - Q_{гг})}, \quad (9)$$

где  $J$  — момент инерции ротора.

Исследование работы ударного генератора на индуктивную нагрузку в режиме накопления энергии проведено на аналоговой вычислительной машине МН-14. При расчетах были приняты следующие исходные параметры:

$L_{гг} = 5 \cdot 10^{-5}$  гн;  $r_{гг} = 5 \cdot 10^{-4}$  ом;  $\omega_0 = 314$ ;  $E_{мо} = 22000$  в;  $r_{н} = k r_{гг}$ ;  $L_{н} = k L_{гг}$ ;  $k = 1, 2, 3 \dots 10$ . Начальный запас кинетической энергии ротора изменялся от  $T_0 = 5 \cdot 10^8$  дж до  $2 \cdot 10^8$  дж. В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены полученные на МН-14 кривые изменения токов генератора и нагрузки, э. д. с. генератора, угловой частоты и кинетической энергии ротора для граничных значений  $T_0$  при  $L_{н} = L_{гг}$ .

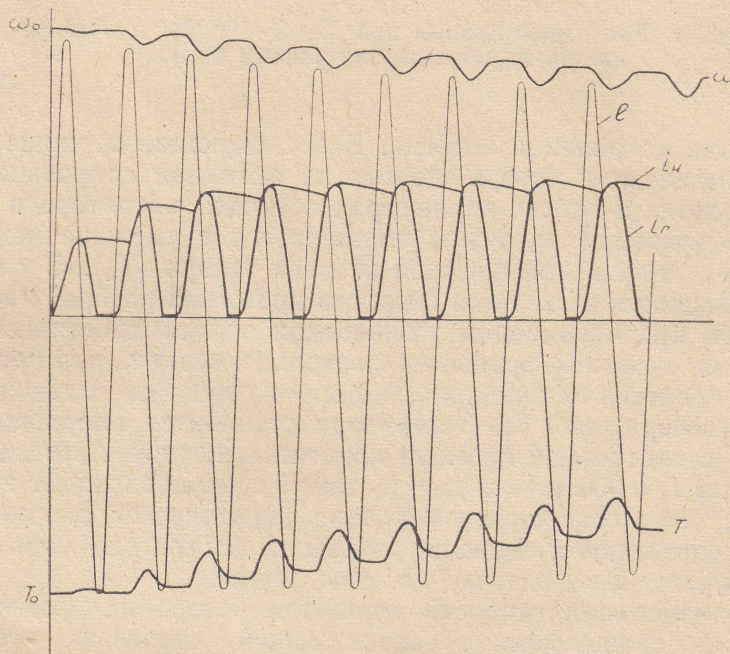


Рис. 3. Расчетные кривые при  $T_0 = 5 \cdot 10^8$  дж и коэффициенте преобразования равном 0,05

Рассмотренные варианты при  $L_{н} = L_{гг}$  сведены в табл. 1. В качестве критерия оценки эффективности накопления энергии принято значение ударного тока ( $I_{уд.}$ ) внезапного короткого замыкания на зажимах обмотки статора при  $\omega = \text{const}$  и величина электромагнитной энергии, запасаемой при этом в полях рассеяния обмотки ( $Q_{кз}$ ).

Расчеты показывают, что изменение скорости вращения оказывает существенное влияние на величину максимально достижимого тока в нагрузке и накопленной электромагнитной энергии. Амплитуда тока нагрузки достигает близкого к величине ударного тока значения за три-

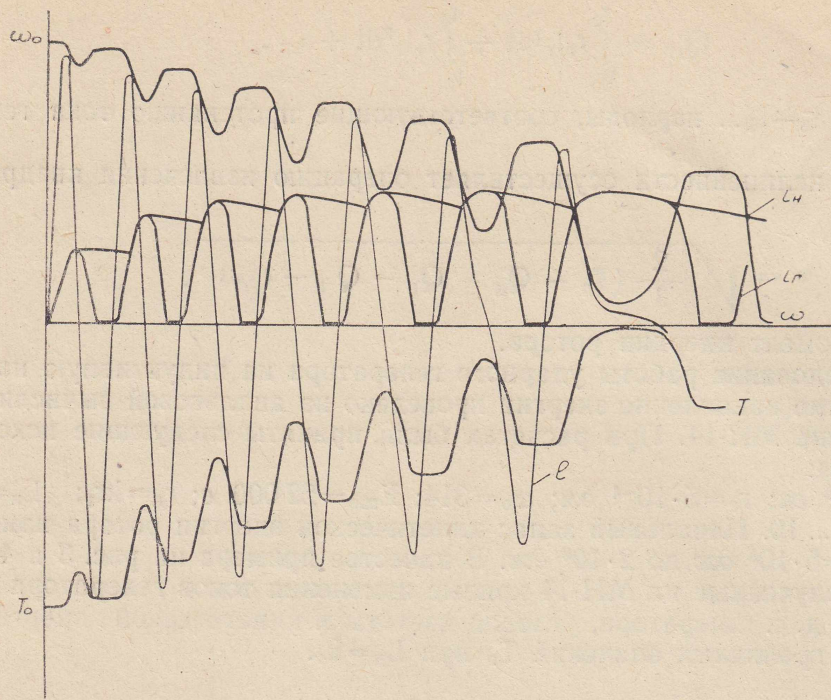


Рис. 4. Расчетные кривые при  $T_0 = 2 \cdot 10^8$  дж и коэффициенте преобразования равном 0,125.

четыре периода накопления энергии. В последующие периоды происходит лишь компенсация потерь энергии на активном сопротивлении нагрузки. При одних и тех же параметрах обмотки генератора и нагрузки энергия, передаваемая нагрузке, уменьшается с уменьшением величины начального запаса кинетической энергии ротора ( $T_0$ ). С уменьшением  $T_0$  увеличиваются колебания скорости вращения ротора. Расчеты показывают, что при чрезмерном уменьшении запаса кинетической энергии колебания скорости вращения настолько велики, что может произойти срыв процесса накопления, характеризующийся остановкой ротора ударного генератора. Ток генератора становится аperiodическим и уменьшается с постоянной времени короткозамкнутой обмотки статора. Например, при  $T_0 = 200$  мдж и  $L_n = L_r$  такой срыв происходит на 8 периоде процесса, хотя оставшаяся величина кинетической энергии ротора после предшествующего периода работы в десять раз больше доли энергии, отбираемой в нагрузку на этом периоде.

Влияние изменения скорости вращения ротора на процесс накопления энергии сказывается с возрастающей степенью при  $L_n > L_r$ . В табл. 2 и 3 приведены значения исследуемых параметров при  $L_n = 4L_r$  и  $8L_r$  для значения  $T_0 = 200$  мдж. Против ожидаемого четырехкратного увеличения накопленной энергии при  $L_n = L_r$  (без учета влияния скорости) и передачи полного запаса энергии  $T_0$  при  $L_n = 8L_r$  получаем в нагрузку всего лишь величину энергии на 20—25% превышающую энергию внезапного короткого замыкания генератора. Процесс накопления энергии длится 7—8 периодов.

Таким образом, исследования показали, что оценка энергии, передаваемой нагрузке от ударного генератора при конечной величине запасенной кинетической энергии ротора, должна производиться с учетом влияния скорости вращения ротора на процесс накопления. Величину накопленной в нагрузку энергии можно повысить, увеличивая запас кинетической энергии ротора с помощью маховика.

Таблица 1

| Параметр   | Размерность | Периоды накопления энергии |       |       |       |       |       | Примечание   |
|------------|-------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|            |             | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |  |
| $I_H$      | о. е.       | 0,50                       | 0,725 | 0,83  | 0,873 | 0,892 | 0,892 | $I_{уд} = 1300$ кА<br>$Q_{кв} = 42,5$ мДж<br>$T_0 = 500$ мДж<br>$\omega_0 = 314$ эл. рад/сек.<br>$L_H = L_r$ |
| $Q_H$      | мДж         | 10,6                       | 22,2  | 29,2  | 32,3  | 33,6  | 33,6  |  |
|            | о. е.       | 0,250                      | 0,523 | 0,687 | 0,76  | 0,79  | 0,79  |  |
| $\Delta Q$ | %           | 31,9                       | 34,1  | 19,7  | 9,9   | 4,4   | 0     |  |
| $T$        | %           | 97,0                       | 92    | 88    | 84,3  | 81    | 78    |  |
| $\omega$   | %           | 99                         | 98    | 95    | 93,8  | 92    | 90,4  |  |
| $I_H$      | кА          | 643                        | 917   | 1040  | 1100  | 1120  | 1130  | $I_{уд} = 1300$ кА<br>$Q_{кв} = 42,5$ мДж<br>$T_0 = 333$ мДж<br>$\omega_0 = 314$ эл. рад/сек.<br>$L_H = L_r$ |
|            | о. е.       | 0,494                      | 0,705 | 0,8   | 0,845 | 0,861 | 0,868 |  |
| $Q_H$      | мДж         | 10,3                       | 21    | 27    | 30,3  | 31,5  | 32    |  |
|            | о. е.       | 0,243                      | 0,494 | 0,635 | 0,713 | 0,741 | 0,753 |  |
| $\Delta Q$ | %           | 32,2                       | 33,4  | 18,8  | 10,3  | 3,8   | 1,5   |  |
| $T$        | %           | 96,0                       | 88,3  | 81,8  | 75,8  | 70,7  | 65,6  |  |
| $\omega$   | %           | 98                         | 94,7  | 91,5  | 88    | 85,3  | 81,8  |  |
| $I_H$      | кА          | 627                        | 910   | 1030  | 1080  | 1110  | 1110  | $I_{уд} = 1300$ кА<br>$Q_{кв} = 42,5$ мДж<br>$T_0 = 250$ мДж<br>$\omega_0 = 314$ эл. рад/сек.<br>$L_H = L_r$ |
|            | о. е.       | 0,483                      | 0,70  | 0,793 | 0,83  | 0,854 | 0,854 |  |
| $Q_H$      | мДж         | 9,8                        | 20,7  | 26,5  | 29,8  | 30,8  | 30,8  |  |
|            | о. е.       | 0,231                      | 0,487 | 0,623 | 0,701 | 0,725 | 0,725 |  |
| $\Delta Q$ | %           | 31,8                       | 35    | 19,0  | 10,9  | 3,3   | 0     |  |
| $T$        | %           | 95                         | 84    | 74,5  | 67    | 59,8  | 52,5  |  |
| $\omega$   | %           | 97,5                       | 91,8  | 86,9  | 82    | 78    | 72,5  |  |
| $I_H$      | кА          | 605                        | 882   | 1000  | 1040  | 1060  | 1060  | $I_{уд} = 1300$ кА<br>$Q_{кв} = 42,5$ мДж<br>$T_0 = 200$ мДж<br>$\omega_0 = 314$ эл. рад/сек.<br>$L_H = L_r$ |
|            | о. е.       | 0,465                      | 0,678 | 0,77  | 0,80  | 0,815 | 0,815 |  |
| $Q_H$      | мДж         | 9,14                       | 19,4  | 25    | 27    | 28,4  | 28,4  |  |
|            | о. е.       | 0,215                      | 0,457 | 0,588 | 0,635 | 0,67  | 0,67  |  |
| $\Delta Q$ | %           | 32,2                       | 36    | 19,8  | 7,0   | 6,0   | 0     |  |
| $T$        | %           | 94                         | 81,2  | 69,3  | 60    | 50,6  | 40,6  |  |
| $\omega$   | %           | 97                         | 88    | 82    | 77    | 70,7  | 63,7  |  |

| Параметр   | Размерность  | Периоды накопления энергии |       |       |      |       |       |       | Примечание   |
|------------|--------------|----------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--|
|            |              | 1                          | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     |  |
| $I_H$      | <i>кА</i>    | 226                        | 408   | 532   | 612  | 670   | 707   | 720   | $I_{уд} = 1300 \text{ кА}$<br>$Q_{кз} = 42,5 \text{ мДж}$<br>$T_0 = 200 \text{ мДж}$<br>$\omega_0 = 314 \text{ эл. рад/сек}$<br>$L_H = 4L_r$ |
|            | <i>о. е.</i> | 0,174                      | 0,314 | 0,408 | 0,47 | 0,515 | 0,544 | 0,554 |  |
| $Q_H$      | <i>мДж</i>   | 5,11                       | 16,7  | 28,3  | 37,4 | 44,8  | 50,0  | 51,8  |  |
|            | <i>о. е.</i> | 0,120                      | 0,393 | 0,666 | 0,88 | 1,05  | 1,18  | 1,22  |  |
| $\Delta Q$ | %            | 9,8                        | 22,4  | 22,4  | 17,5 | 14,3  | 10,0  | 3,6   |  |
| $T$        | %            | 96                         | 90,7  | 80,8  | 69,3 | 58,1  | 47,5  | 36,9  |  |
| $\omega$   | %            | 98                         | 95    | 90    | 83,8 | 76,8  | 69    | 60,6  |  |

Таблица 3

| Параметр   | Размерность  | Периоды накопления энергии |       |       |       |       |       |       |      |      | Примечание  |
|------------|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|---|
|            |              | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8    | 9    |   |
| $I_H$      | <i>кА</i>    | 124                        | 234   | 328   | 394   | 445   | 481   | 503   | 518  | 518  | $I_{уд} = 1300 \text{ кА}$<br>$Q_{нз} = 42,5 \text{ мДж}$<br>$T_0 = 200 \text{ мДж}$<br>$\omega_0 = 314 \text{ эл. рад/сек.}$<br>$L_H = 8L_T$ |
|            | <i>о. е.</i> | 0,095                      | 0,18  | 0,252 | 0,303 | 0,343 | 0,370 | 0,387 | 0,40 | 0,40 |   |
| $Q_H$      | <i>мДж</i>   | 3,07                       | 11,0  | 21,7  | 31,0  | 39,6  | 46,3  | 50,6  | 53,7 | 53,7 |   |
|            | <i>о. е.</i> | 0,072                      | 0,259 | 0,511 | 0,73  | 0,934 | 1,09  | 1,19  | 1,26 | 1,26 |   |
| $\Delta Q$ | %            | 5,3                        | 15,1  | 19,7  | 17,7  | 16,2  | 12,6  | 7,9   | 5,0  | 0    |   |
| $T$        | %            | 96                         | 94    | 88    | 78    | 68    | 57    | 47    | 36   | 26   |   |
| $\omega$   | %            | 98                         | 96    | 94    | 88    | 82    | 75,5  | 68    | 60   | 51   |   |



## ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ивашин, А. В. Лоос, Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Накопление энергии в индуктивной нагрузке от ударного генератора. Электронные ускорители (Труды VI Межвузовской конференции по электронным ускорителям, Томск, 1966). М., «Энергия», 1968.
  2. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков, А. В. Лоос. Схема накопления энергии в однофазной индуктивной нагрузке от трехфазного ударного генератора. Известия ТПИ, т. 145, изд-во ТГУ, 1966.
  3. В. В. Ивашин, А. В. Лоос, Г. А. Сипайлов. Накопление энергии в индуктивной нагрузке от ударного генератора. Известия ТПИ, т. 145, Томск, изд-во ТГУ, 1966.
  4. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть), М., ГЭИ, 1949.
  5. Г. А. Сипайлов, В. В. Ивашин. Устройство для накопления энергии в индуктивной нагрузке. Авт. свидетельство № 173823, Бюллетень изобретений № 16, 1965.
-