

УДК: 621.311.1

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

*Федосов Сергей Викторович*, академик РААСН, д.т.н., профессор НИУ МГСУ, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, e-mail: [fedosov-academic53@mail.ru](mailto:fedosov-academic53@mail.ru)

*Гусенков Алексей Васильевич*, к.т.н., доц. ФГБОУ ВО «ИГЭУ», Россия, 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34, e-mail: [avgus@ispu.ru](mailto:avgus@ispu.ru)

*Лебедев Владимир Дмитриевич*, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «ИГЭУ», Россия, 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34, e-mail: [vd\\_lebedev@mail.ru](mailto:vd_lebedev@mail.ru)

*Соколов Александр Михайлович*, д.т.н., доцент ФГБОУ ВО «ИГЭУ», Россия, 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34. e-mail: [alex2010fn@yandex.ru](mailto:alex2010fn@yandex.ru)

*Шадриков Тимофей Евгеньевич*, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «ИГЭУ», Россия, 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34. e-mail: [pr3d37@gmail.com](mailto:pr3d37@gmail.com)

**Аннотация.** В статье, отражена концепция системы электроснабжения повышенной частоты, выполненная на основе транзисторного преобразователя напряжения с применением транзисторов типа IGBT и высоковольтных кабельных линий электропередачи, работающих на напряжении повышенной частоты. Такие системы в первом приближении могут быть рассмотрены как локальные электротехнические комплексы повышенной частоты (ЭТКПЧ).

Показана практическая возможность применения локальных систем электроснабжения повышенной частоты в составе сетей электропитания промышленных предприятий строительной сферы для реализации современного способа электротепловой обработки бетонных и железобетонных изделий. Дана схема локального ЭТКПЧ, способ его выполнения в условиях промышленного предприятия, а также основные практические данные полученные в ходе экспериментов с таким комплексом на практике – зависимости токов и напряжений, параметров температуры обрабатываемого изделия и в целом эффективности процесса ЭТО с применением локального ЭТКПЧ.

Полученные результаты применения на практике ЭТКПЧ для проведения электротепловой обработки показывают хорошие перспективы для реализации подобной технологии в условиях строительных предприятий.

**Ключевые слова:** электротепловая обработка, повышенная частота, IGBT, преобразователь напряжения, система электроснабжения.

## ON THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF INDUSTRIAL ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS OF THE INCREASED FREQUENCY IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

*Fedosov Sergey Viktorovich* RAASN academician, doctor of technical Sciences, prof. NRU MGSU, Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, e-mail: [fedosov-academic53@mail.ru](mailto:fedosov-academic53@mail.ru)

*Gusenkov Alexey Vasilyevich*, Ph.D. Assoc. ISPU, Russia, 153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str. 34. e-mail: [avgus@ispu.ru](mailto:avgus@ispu.ru)

*Lebedev Vladimir Dmitrievich*, Ph.D. Assoc. ISPU, Russia, 153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str. 34. e-mail: [vd\\_lebedev@mail.ru](mailto:vd_lebedev@mail.ru)

*Sokolov Alexander Mikhailovich*, Doctor of Technical Sciences Assoc. ISPU, Russia, 153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str. 34. e-mail: [alex2010fn@yandex.ru](mailto:alex2010fn@yandex.ru)

*Shadrikov Timofey Evgenievich*, Ph.D. Assoc. ISPU, Russia, 153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str. 34. e-mail: [pr3d37@gmail.com](mailto:pr3d37@gmail.com)

**Annotation.** Article presents the concept of a high-frequency power supply system based on a transistor voltage converter using transistors of the IGBT type and high-voltage cable power lines operating at a high-frequency voltage. To a first approximation, such systems can be considered as local increased frequency electrical power systems (IFEPS).

The practical possibility of using local power supply systems of increased frequency as part of the power supply networks of industrial enterprises in the construction sector for the implementation of the modern method of electrothermal treatment of concrete and reinforced concrete products is shown. The scheme of the local IFEPS is given, the method of its implementation in an industrial enterprise, as well as the main practical data obtained in the course of experiments with such a complex in practice – dependences of currents and voltages, temperature parameters of the workpiece and, in general, the efficiency of the electrothermal treatment of concrete process using a local IFEPS.

The obtained results of practical application of the IFEPS for electrothermal treatment show good prospects for the implementation of such technology in the conditions of construction enterprises.

**Key words:** electrothermal treatment, increased frequency, IGBT, voltage converter, power supply system.

В настоящее время актуальной является разработка и применение систем электроснабжения на основе полупроводниковых преобразователей напряжения, основанных на последних достижениях в области силовой электроники, а именно применении IGBT транзисторов большой мощности или их сборок (модулей) [1,2]. Такие системы электроснабжения позволяют гибко управлять режимами работы потребителей, параметрами системы (напряжения, перетоки мощности, фазовый угол и т.п.) и повышают энергоэффективность процесса передачи и распределения электрической энергии внутри предприятия [3]. Одним из главных направлений применения подобных систем являются их использование на строительных предприятиях [1-3], на которых осуществляется или планируется внедрение системы электротепловой обработки бетонных (ЭТО) изделий на основе токов и напряжений повышенной частоты [1-5]. Применение ЭТО позволяет многократно повысить энергетические показатели тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий по сравнению с существующими и привычными способами тепловой обработки (тепло-влажностная обработка, продуктами сгорания газа, подогрев горячей водой и т.п.) [1].

В основе системы электроснабжения нового типа лежит локальный электротехнический комплекс повышенной частоты (ЭТКПЧ), состоящий в общем случае из выпрямителя, преобразователя напряжения [6-7], повышающих и понижающих трансформаторов [8], кабельной линии [9] и нагрузки [1-3]. Упрощенная схема такого ЭТКПЧ представлена на рис. 1.

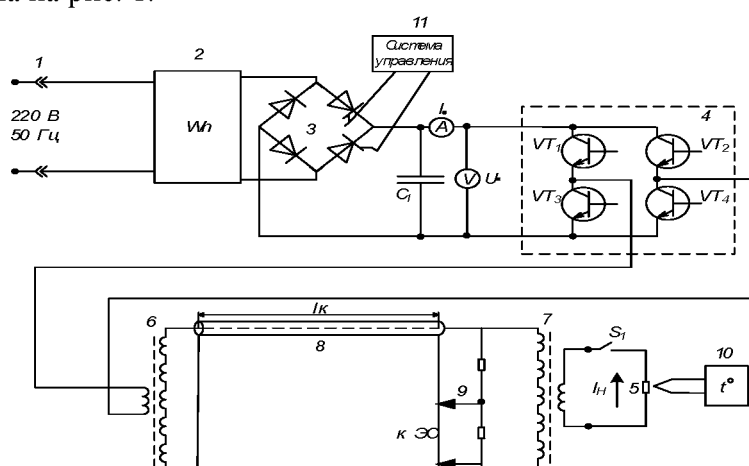


Рис. 1. Схема локального ЭТКПЧ 1 – питающая сеть промышленного предприятия; 2 – счетчик электрической энергии; 3 – полупроводниковый управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – нагрузка; 6, 7 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы; 8 – высоковольтная кабельная линия; 9 – делитель напряжения, 10 –  $t^\circ$  – термометр, состоящий из блоков типа ТС-1088 и ИКСУ-260, 11 – система управления выпрямителем

Подключение локального ЭТКПЧ производится от сети промышленной частоты 50 Гц напряжением 220 В через счетчик потребленной электрической энергии (2). Мощность с выхода полупроводникового преобразователя напряжения (4) передается в обрабатываемое изделие (нагрузку) (5) через силовые высоковольтные повышающие/понижающие трансформаторы 6, 7 и кабельную линию (8). Номинальная мощность силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты 6, 7 (рис. 1) составляла  $\sim 3$  кВА, номинальное напряжение низковольтной/высоковольтной обмотки – 0,25/1,25 кВ. В качестве высоковольтной кабельной линии 8 (рис. 1) использовался кабель типа РК-75  $l_K = 30$  м. Частота выходного напряжения транзисторного преобразователя напряжения  $f_I$  составила 13 кГц, в конструкции преобразователя применялись мощные IGBT транзисторы International Rectifier IRG4PSH71UDPBF. Указанная схема на рис. 1 в случае повышения мощности нагрузки и масштабирования применения ЭТО на практике может быть адаптирована к трехфазному подключению. В этом случае выпрямитель (3) имеет другую конструкцию и может выполняться трехфазным для подключения к сети трехфазной сети 0,4 кВ.

В случае проведения реальных экспериментов, обрабатываемое изделие (нагрузка 5) представляла собой фундаментный блок, имеющий размеры 1100x580x400, для изготовления которого с использованием ЭТО электродным методом используется опалубка, выполненную из диэлектрических материалов с теплоизоляцией (ламинированная фанера с пенопластом). Опалубка до укладки в нее бетона и после укладки показана на рис. 2.

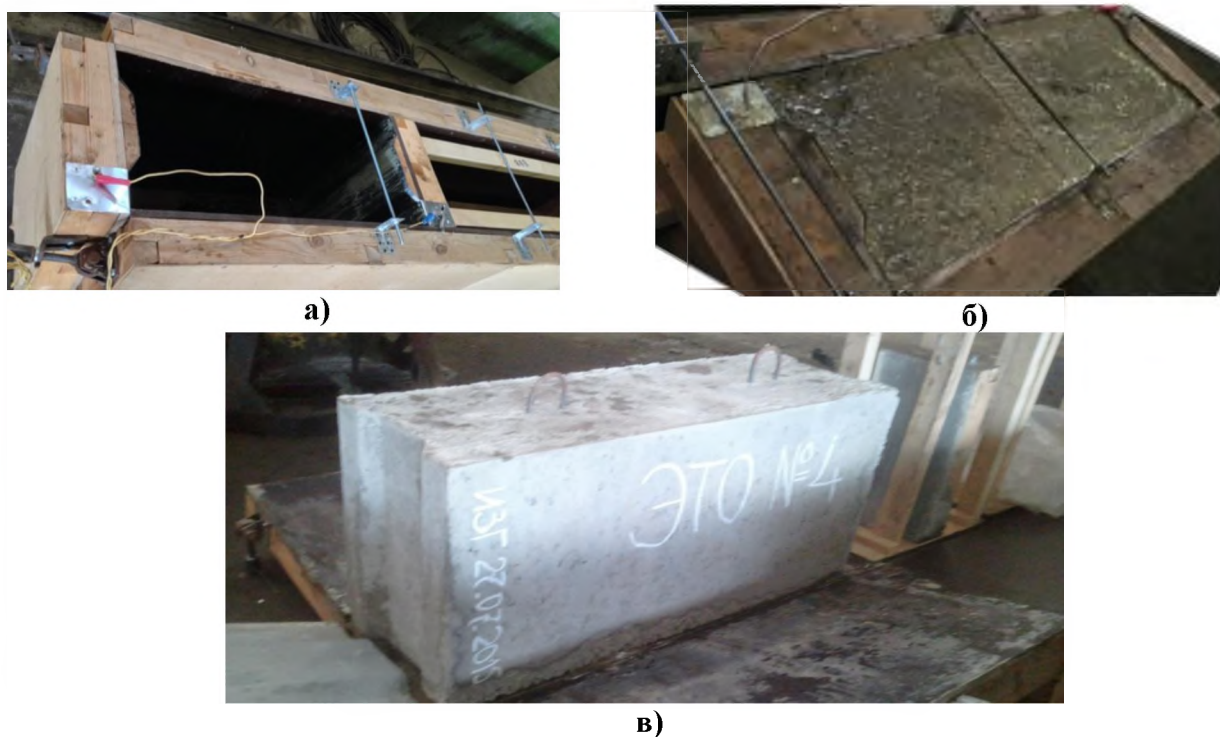
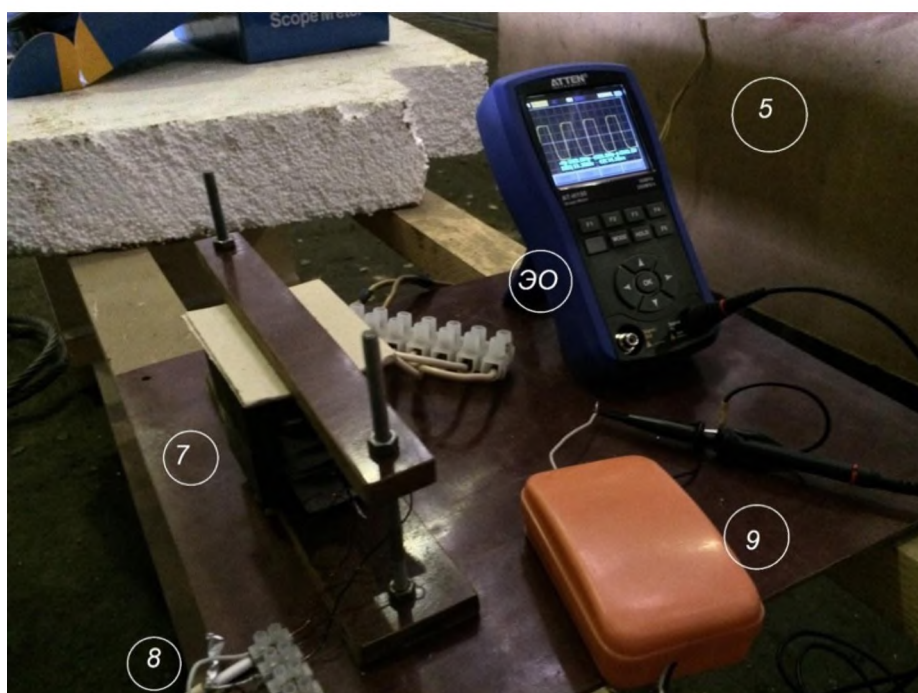
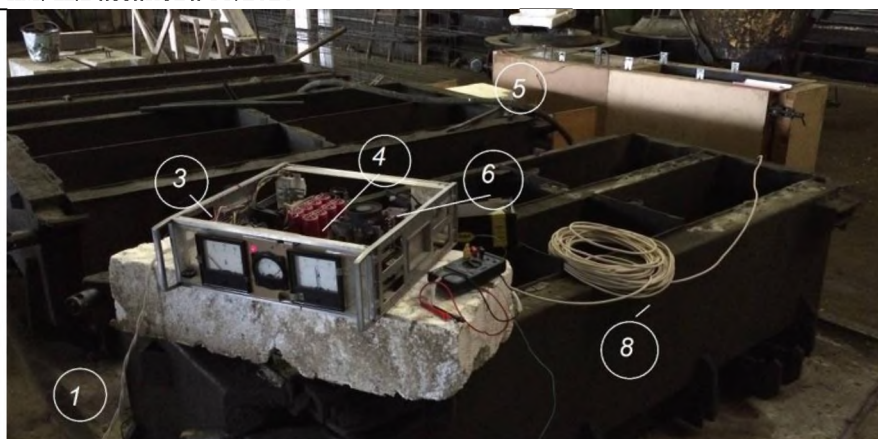


Рис. 2. Опалубка для ЭТО бетона при испытании локального ЭТКПЧ: а – до укладки бетона; б – после укладки свежего бетона; в – распалубка с готовым изделием после ЭТО

Такой ЭТКПЧ согласно рис. 1 был использован для проведения экспериментов в условиях действующего строительного предприятия. Общий вид и обозначения показаны на рис. 3.



**Рис.3. ЭТКПЧ в ходе эксперимента в производственных условиях 1 – питающая сеть промышленного предприятия; 3 –управляемый полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – обрабатываемое изделие (фундаментный блок); 6, 7 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы; 8 – высоковольтная кабельная линия; 9 – делитель напряжения, ЭО – электронный осциллограф в момент осциллографирования высокого напряжения в конце кабельной линии**

Укладка свежего бетона производилась в специальную опалубку (рис. 2), выполненную из диэлектрических материалов с теплоизоляцией, снабженную встроенными электродами (подключены к выходу понижающего трансформатора). После коммутации установки в работу в толще бетона (бетон класса В12) начинает протекать ток повышенной частоты. Вследствие диэлектрических потерь в бетоне происходит преобразование электрической энергии в тепловую и разогрев изделия до необходимой температуры. Затем следует стадия изотермической выдержки при постоянной температуре, после чего подача электроэнергии прекращается и происходит естественное охлаждение изделия [1,3]. В ходе эксперимента измерялась энергия  $W_{ВХ}$ , Дж, полученная из питающей сети, значения тока  $I_{ex}$ , А, и напряжения  $U_{ex}$ , В, в звене постоянного тока (т.е. на входе транзисторного преобразователя напряжения) и температура изделия в различных точках  $T_i$ , °С. Для анализа режима работы ЭТКПЧ применяется усредненное значение температуры  $T_{\Sigma}$ , °С. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1.

## Результаты эксперимента

$\tau$ , мин	$I_{вх}$ , А	$U_{вх}$ , В	$P_{вх}$ , кВт	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$T_3$ , °С	$T_4$ , °С	$T_{\Sigma}$ , °С
0	9	245	2,205	23	23	23	23	23
30	9	227	2,043	25	24	28	24	25,25
60	9,5	224	2,128	30	29	34,5	29	30,6
90	9,5	213	2,023	35	34	41	33	35,75
120	9,5	213	2,023	40	40	46	38	41

На рис. 4 представлены зависимости изменения во времени входных тока, напряжения и мощности  $P_{ex} = U_{ex}I_{ex}$ , передаваемой от управляемого выпрямителя в полупроводниковый преобразователь напряжения (рис. 1), полученные в процессе ЭТО фундаментного блока 1100x580x400 мм. Как следует из табл. 1 и рис. 3, 4, измерения в ходе эксперимента производились через одинаковые промежутки времени 30 мин. При этом на каждом из этих временных отрезков электрические параметры  $I_{ex}$ ,  $U_{ex}$ ,  $P_{ex}$  оставались практически неизменными и происходило постепенное увеличение температуры изделия.

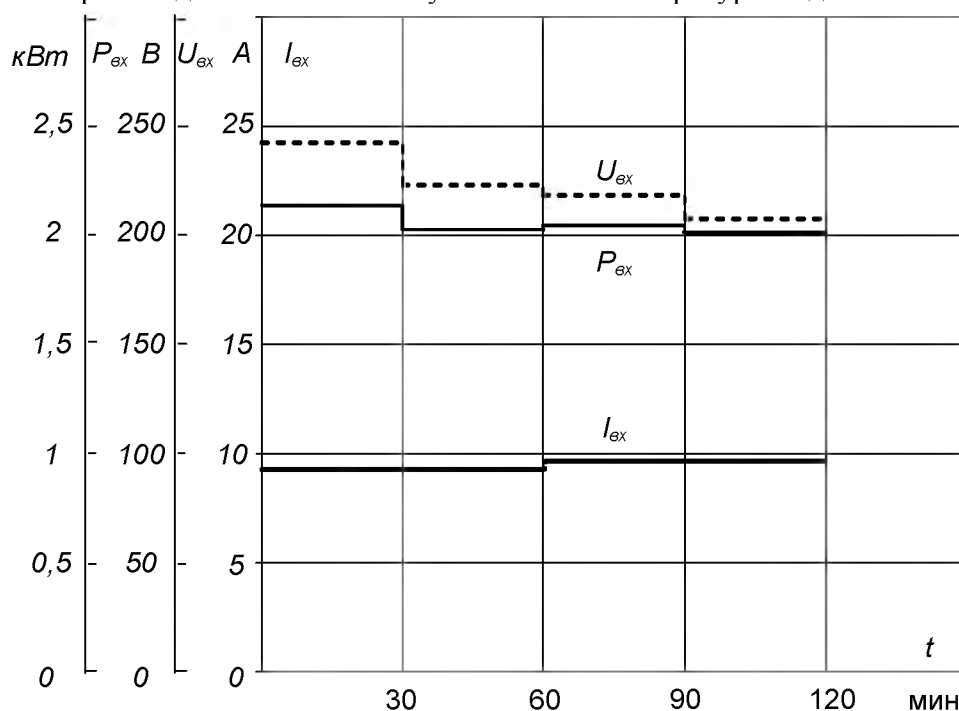


Рис. 4. Изменение электрических параметров ЭТКПЧ ( $U_{ex}$ ,  $I_{ex}$ ,  $P_{ex}$ ) во времени в процессе ЭТО железобетонного изделия

Далее на рис. 5 показано изменение температуры материала во времени от начала ЭТО и до окончания процесса подачи напряжения к опалубке.

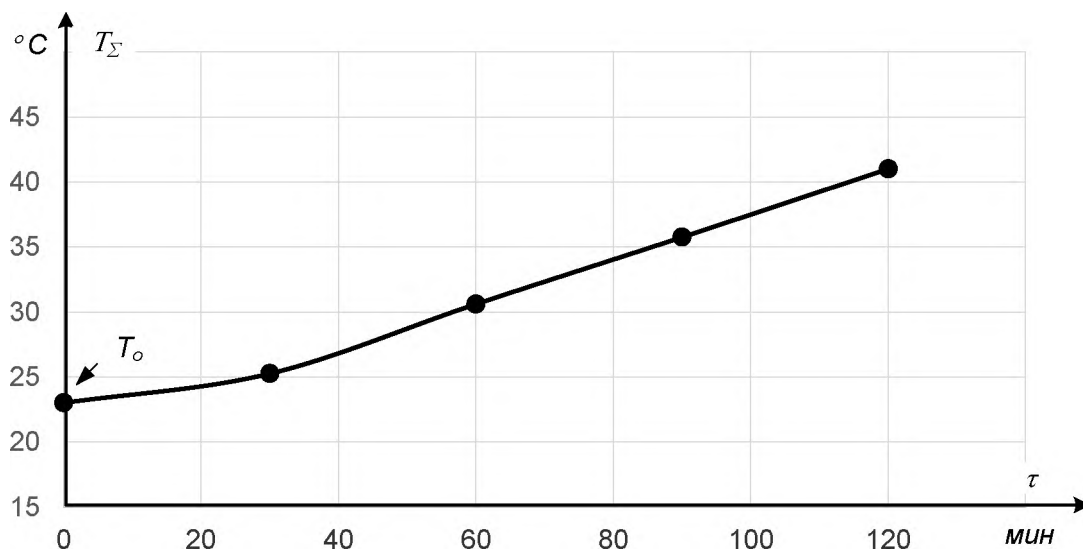


Рис. 5. Зависимость температуры изделия от времени в ходе ЭТО при работе ЭТКПЧ,  $T_0$  – температура окружающей среды в помещении ЭТО

На основании результатов табл. 1 получения значения средневзвешенного КПД (рис. 6) за весь период работы ЭТКПЧ повышенной частоты.

Достижение КПД ЭТКПЧ значений 90% на стадии ЭТО с 90 до 120 минут обуславливается экзотермическими (с выделением тепла) реакциями в бетонной смеси [1-3].

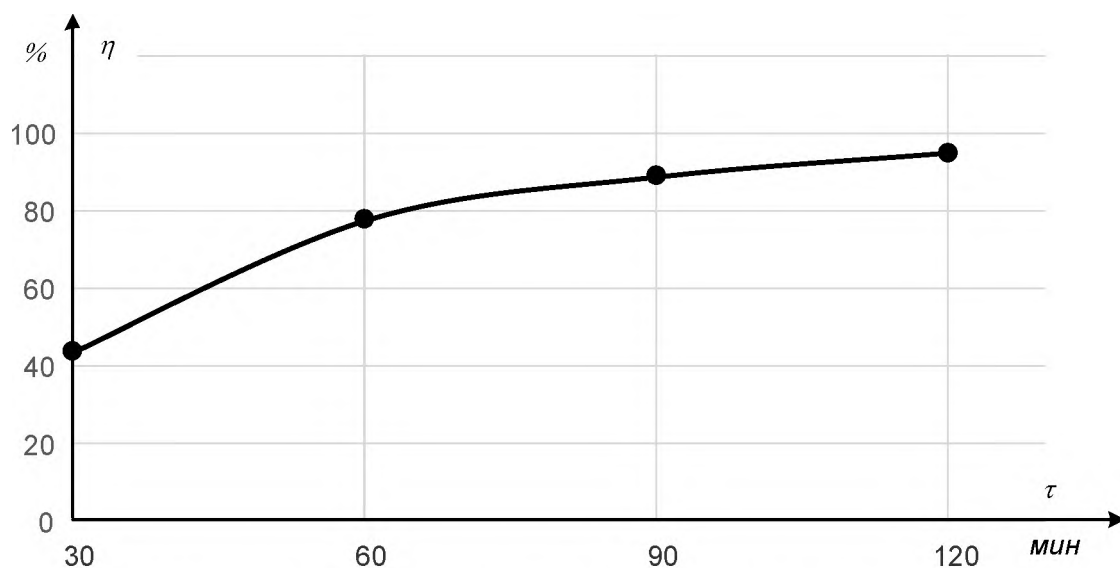


Рис. 6. Зависимость КПД процесса ЭТО с применением локального ЭТКПЧ

### Заключение

По результатам проведенных экспериментальных исследований в производственных условиях и выполнения ЭТО железобетонных изделий можно сделать вывод о высокой энергетической эффективности ЭТКПЧ: его КПД к моменту завершения ЭТО достигает значений 90% (рис. 6), хотя по истечении первых 30 мин этот показатель имеет сравнительно небольшую величину (около 40%). Такой результат обусловлен особенностью физико-химических процессов в твердеющем бетоне в процессе его электрообогрева. На начальном этапе ЭТО (приблизительно первые 30 мин) в бетонной смеси преобладают химические превращения (гидролиз клинкерных составляющих цемента), которые сопровождаются

потреблением тепловой энергии [1]. Поэтому значительная часть электроэнергии, подведенная в обрабатываемому изделию и преобразованная в тепло при протекании электрического тока в толще бетона [1-3] расходуется не на повышение температуры материала изделия, а на осуществление этих химических реакций (рис. 5 и 6), что обуславливает сравнительно невысокое значение КПД.

В дальнейшем, по мере увеличения температуры материала вследствие объемно-однородного разогрева изделия начинают преобладать химические процессы гидратации со значительным выделением тепла, которое добавляется тепловой энергии ЭТО, что приводит к существенному повышению КПД (рис. 6) и ускорению роста температуры (рис. 5). Имеются все основания сделать вывод о технической возможности и целесообразности применения таких локальных ЭТКПЧ в системах централизованного промышленного электропитания строительных предприятий.

### Литература

1. Бобылев В.И., Федосов С.В., Соколов А.М. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона / Монография. Иваново: ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», ИВГПУ, 2016. – 336 с.
2. А.М. Соколов, С.В. Федосов, В.И. Бобылев Методика расчета параметров электротепловой обработки бетонных смесей и железобетонных изделий на установках периодического действия // Известия ВУЗов «Строительство». – 2010. – № 5. – С. 104–113.
3. Бондаренко, В.М. Железобетонные и каменные конструкции / В.М. Бондаренко и др. – М.: Высш. шк., 2007. – 887 с.
4. Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев О возможности и целесообразности физического моделирования электропередачи с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений // Энергетик. №4. – 2015. – С. 29–32.
5. А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, Показатели энергетической эффективности высоковольтного электротехнического комплекса повышенной частоты // Энергетик. №7. – 2017. – С. 6–12.
6. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника, Москва: Техносфера, 2005. – 632 с. ISBN 5-94836-051-2
7. А.С. Страхов, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения // Электричество. № 1. – 2016. – С. 4–12.
8. А.А. Дьячков, Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков, А.А. Симакова Методика определения емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты / // Вестник ИГЭУ. Вып. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2016. – С. 27–33.
9. В.Д. Лебедев, Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков, А.М. Соколов Выбор рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты // Электротехника. № 10. – 2016. – С. 50–56